

Modélisation des transferts de nitrates et de potassium dans un andosol sous bananeraie

Julie Sansoulet^a, Yves-Marie Cabidoche^a, Philippe Cattan^b

^a Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Agropédoclimatique, Domaine Duclos, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe, France

^b Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Unité Systèmes de culture bananes, plantains et ananas, Station de Neufchâteau, 97130 Capesterre Belle Eau, Guadeloupe, France

Correspondence: J. Sansoulet. E-mail: sansoule@antilles.inra.fr

Résumé

Le bananier est cultivé dans des régions tropicales de bilan hydrique excédentaire. Aux Antilles, les bananeraies intensives reçoivent des quantités très élevées d'engrais épandues à proximité du pseudo-tronc (400 kg N/ha/an et 800 kg K/ha/an). Or la bananeraie intercepte et redistribue les pluies au sol : l'écoulement le long du pseudo-tronc (stemflow) concentre 20 fois la pluie incidente sur la section du tronc. Les engrais sont donc immédiatement exposés au stemflow. Le modèle HYDRUS 2D nous aide à établir une méthode de simulation réaliste d'évaluation des transferts distribués d'eau et de solutés, K^+ et NO_3^- , dans un andosol compte tenu de l'hétérogénéité des conditions aux limites induite par le couvert végétal. Les résultats de ces simulations ont été confrontés aux données issues d'expérimentation lysimétriques *in situ*. Les simulations des dynamiques de lixiviation des nitrates et du potassium, calibrées par des paramètres mesurés de transfert hydrauliques et d'adsorption des ions, ont été toutes deux retardées par la Capacité d'Echange Anionique et Cationique. Dans des conditions acides, l'horizon B, avec une grande proportion d'allophane, a préférentiellement développé une affinité pour les nitrates. Au contraire, l'horizon A, *via* les nombreux sites organiques, a

plutôt exhibé une affinité pour le potassium. Malgré ces capacités d'échange, les pertes des ions K^+ et NO_3^- au pied du bananier suite à l'infiltration du stemflow étaient 2 à 3 fois supérieures sous le pseudo-tronc du bananier que dans le rang puisque cette zone recevait le throughfall.

Mots clés : drainage, stemflow, bananier, andosol, HYDRUS 2D, transferts

Title and abstract

Modelling of nitrates and potassium transfers in an andosol under banana cropping

The banana plant is cultivated in tropical areas with humid climate. In the French West Indies, the intensive banana plantations receive near the pseudo-stem very high quantities of fertilisers which can reach 400 kg N/ha/year and 800 kg K/ha/year. In addition, the banana plant intercepts and redistributes the rains to the soil: the flow along the pseudo-stem (stemflow) concentrates 20 times the incidental rain related to the section of the stem. Thus fertilisers are immediately exposed to the stemflow. Distributed water and solute (K^+ , NO_3^-) movements in the soil were simulated using HYDRUS-2D model. The *in situ* drainage data obtained thanks to wick lysimeters help in evaluating the model simulations. K^+ and NO_3^- leaching simulations in an andosol were calibrated thanks to the evaluation of the hydraulic parameters and the parameter (Van Genuchten) of ion adsorption (Langmuir-Freundlich) and showed that leachings were both retarded because of the Cation and Anion Exchange Capacities. Under acidic conditions, the B horizon, with higher allophane content, preferentially developed affinity for nitrates. On the contrary, the A horizon, via the organic and mineral sites, would exhibit a affinity for potassium. In the field, under the Banana stem, K^+ et NO_3^- leachings were 2 to 3 times higher than in the inter-row because of abundant stemflow.

Key words: drainage, stemflow, banana , andosol, HYDRUS 2D, transfers

INTRODUCTION

Le bananier trouve les conditions optimales de son développement dans des régions tropicales de bilan hydrique excédentaire, et sur des sols généralement bien pourvus en minéraux majeurs et mineurs : c'est le cas des régions d'andosols sur roches volcaniques, où les cultures bananières sont fortement répandues (Petites Antilles, Equateur, Costa Rica, Cameroun, Indonésie, Philippines...).

En Guadeloupe, le recours à la fertilisation et aux travaux mécanisés du sol s'est intensifié depuis la moitié du siècle dernier, en particulier sur cultures bananières. Ces cultures, intensives dans les plantations industrielles, reçoivent des quantités très élevées d'intrants solubles pouvant atteindre 400 kg N/ha/an et 800 kg K/ha/an (Godefroy and Dormoy, 1988). D'autre part, la bananeraie intercepte et redistribue les pluies à l'interface atmosphère-sol : la pluie redistribuée peut-être divisée en stemflow (flux le long du pseudo-tronc) et throughfall (flux sous les feuilles) (Levia and Herwitz, 2000, Bussière, 2002). L'interception de la pluie par le couvert végétal conduit dans le cas de la bananeraie à une forte redistribution des hauteurs d'eau au sol. Ainsi, des mesures au champ ont montré que les flux des eau s'écoulant le long du pseudo-tronc du bananier (stemflow) rapportés à la section de ce pseudo-tronc étaient 10 à 15 fois supérieur à la pluie incidente. Les intrants solubles qui sont épandus manuellement à proximité du pseudo-tronc, sont donc immédiatement exposés aux concentrations d'eaux issues du stemflow.

Ce fonctionnement hydrologique distributif de l'eau associé à une distribution hétérogène des solutés est susceptible d'entraîner les intrants solubles vers les horizons profonds de l'andosol où coexiste une adsorption conjointe de cations et d'anions (Wada, 1989). L'andosol comporte en effet des charges variables en fonction du pH. En l'absence d'amendement basique, il y aurait stockage des nitrates grâce à la capacité d'échange anionique dans les horizons les plus profonds.

Ces caractéristiques font des bananeraies sur andosol des configurations culturales sur lesquelles on ne peut porter de diagnostic ni suggérer des pratiques de fertilisation optimisées que si l'on comprend et sait prévoir les flux sortants de solutés, dans un contexte de sol dont la sorptivité des anions et cations est manipulable. Des outils informatiques, associés à des expérimentations *in situ* sont nécessaires pour gérer de tels systèmes. Aussi, le rôle des modèles numériques est devenu croissant ces 25 dernières années et a aidé à la compréhension des mécanismes de transferts des ions dans les sols (Feddes *et al.*, 1978; Belmans *et al.*, 1983; Simunek *et al.*, 1995; Brisson *et al.*, 2003). Deux aspects essentiels sont à prendre en compte lors de la modélisation des transferts de solutés sous bananeraie : (i) simuler les transferts en 2 dimensions à l'échelle de la plante et de son rang (ii) évaluer l'influence de la distribution de la pluie à l'interface plante-sol sur la distribution de la lixiviation des ions. Dans ce sens, il apparaît qu'une approche distribuée permettant l'identification de zones critiques susceptibles de contribuer à la lixiviation précoce des solutés, comme les transferts sous le bananier, soit probablement la plus appropriée (distribution des conditions aux limites, des propriétés de sol). Parmi les nombreux modèles existants, HYDRUS 2D a été choisi car il permet d'appliquer deux conditions aux limites différentes à la surface du domaine (stemflow and throughfall), il assiste les utilisateurs dans la conception en 2D du domaine, intègre différentes couches de sol, permet d'incliner les sols, considère la nutrition minérale de la plante et distingue l'évaporation du sol et des feuilles. Une littérature abondante a été produite sur l'utilité du modèle HYDRUS pour simuler les fluctuations des nappes phréatiques (Ventrella *et al.*, 2000; Chabot *et al.* 2002), prédire le drainage d'eau et d'engrais dans la zone saturée et non saturée du sol (Simunek and Vos, 1999), évaluer le transport de pesticides dans le sol (Persicani *et al.*, 1995; Pang *et al.*, 2000). Cependant, aucune étude n'a reporté la modélisation de la distribution des transferts d'engrais avec des conditions aux limites hétérogènes.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les transferts hydriques et d'ions dans un andosol sous bananeraie. Le modèle HYDRUS 2D nous aide à établir une méthode d'évaluation des transferts de fertilisants, K^+ et NO_3^- , la plus proche des conditions in situ. La calibration de ce modèle passe essentiellement par l'évaluation des paramètres hydrauliques et d'adsorption des ions dans le sol. Les résultats de ces simulations sont confrontés aux données issues d'expérimentation lysimétriques.

MATERIELS ET METHODES

Les mécanismes de transport des ions, K^+ et NO_3^- , dans un andosol sous bananier ont été appréhendés *via* le modèle HYDRUS 2D (U.S Salinity Laboratory, Riverside CA, Simunek *et al.*, 1999), simulant les transferts d'eau selon la formulation de Darcy et les transferts de solutés selon l'équation de transport convection-dispersion. Le domaine et le maillage de ce domaine ont été dessinés, les conditions initiales et aux limites définies. Les propriétés hydrauliques de l'andosol, et les propriétés d'adsorption des ions K^+ et NO_3^- à différents niveaux de pH, ont été estimées au laboratoire, en conditions contrôlées et employées comme paramètres d'entrée pour simuler les transferts. Le modèle a été calé à l'aide de données issues d'expérimentations lysimétriques *in situ* réalisées en 2003 et 2004.

Modélisation du transport d'eau

L'écoulement est conditionné par les variations du potentiel hydrique total de l'eau. Il s'effectue des points où ce potentiel est élevé vers ceux où il est le plus bas. La variation de la charge hydraulique totale et la vitesse à laquelle se produit l'écoulement sont définies par l'équation de Richards. Elle est issue de la combinaison de l'équation de Darcy et de l'équation de continuité, combinaison à laquelle un terme puits a été rajouté :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S$$

Où : θ est l'humidité volumique [L³L⁻³], t le temps [T], z la profondeur sous la surface du sol [L], K la conductivité hydraulique [LT⁻¹] et h le potentiel de pression [L] et S un terme puits [T⁻¹].

Cette équation non linéaire ne peut être résolue analytiquement en dehors de situations particulières. Une linéarisation de ces équations (éléments finis) et un mode de résolution numérique (calcul de convergence) sont nécessaires. Le temps et l'espace doivent être discrétisés de sorte que les erreurs numériques soient minimisées. Le maillage et les pas de temps doivent être resserrés lorsque ces équations deviennent fortement non linéaires (discontinuités, régime hydrique variable). Pour décrire de façon continue la fonction $\theta(h)$, nous avons opté pour la forme analytique du modèle de Van Genuchten (1980) car elle est relativement simple et aisément dérivable. Elle permet de mieux rendre compte de l'existence du point d'inflexion sur les courbes $\theta(h)$ et des changements de pente autour de celui-ci. La fonction de conductivité hydraulique en conditions non saturées est dépendante des paramètres de rétention de l'eau dans le sol. Les expressions mathématiques décrites par Van Genuchten (1980) sont les suivantes :

$$\theta(h) = \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} + \theta_r \quad h < 0$$

$$\theta(h) = \theta_s \quad h \geq 0$$

$$\text{avec } m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1$$

$$\text{et } K(h) = K_s s_e^l \left[1 - (1 - s_e^{1/m})^m \right]^2$$

$$\text{avec } s_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

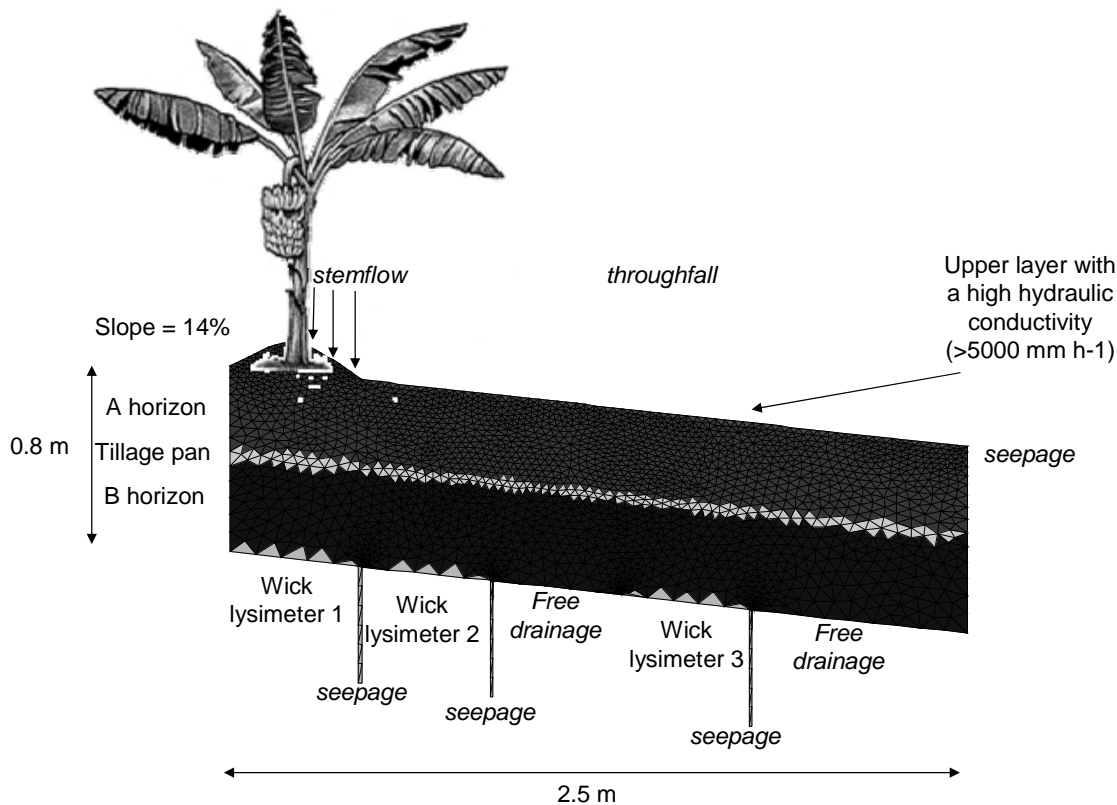
Où : θ_r est l'humidité résiduelle [L³L⁻³], θ_s l'humidité à saturation [L³L⁻³], h le potentiel de pression, α , n et l sont des paramètres empiriques d'ajustement. K_s est la conductivité

hydraulique à saturation [LT^{-1}] Le paramètre l corrige la pente de la fonction $K(h)$; plus il sera élevé plus la pente sera forte. Ce paramètre estimé est généralement estimé proche de 0,5 pour de nombreux sols (Mualem, 1976).

Afin d'établir $\theta(h)$ et $K(h)$, nous avons utilisé une méthode de laboratoire proposée par Wind (1968), et récemment évalué par Tamari *et al.* (1993) et Simunek *et al.* (1998) d'un point de vue théorique, et par Mohrath *et al.* (1997), d'un point de vue pratique. Il s'agit d'une méthode basée sur les mesures quotidiennes de profil de potentiel de pression et de teneur en eau d'une colonne de sol pendant une période d'évaporation. Afin d'ajuster les données correctement à saturation, des mesures directes de la conductivité hydraulique à saturation ont été faites en utilisant des infiltromètres à disque et à doubles anneaux (Sansoulet, 2004). Les 4 paramètres du modèle Mualem Van Genuchten ont été obtenus en minimisant la somme des carrés des écarts entre les teneurs en eau mesurées et calculées sur des échantillons de l'horizon A et B.

Les flux de lixiviation simulés à l'aide d'HYDRUS 2D ont été comparés aux résultats expérimentaux, obtenus sur 100 jours en bananeraie, grâce des lysimètres à suintement de 45×45 cm² installés à 70 cm de profondeur dans le sol. Le dispositif lysimétrique, décrit par Sansoulet *et al.* (2006), interceptait les flux à différentes positions relatives au pseudo-tronc. Les hypothèses étaient les suivantes : (i) sous le bananier, le lysimètre 1 recueillait l'essentiel du stemflow et des solutés issus d'apport d'engrais localisés autour du pseudo-tronc ; (ii) entre 25 et 70 cm en aval du rang, le lysimètre 2 recueillait la part non interceptée par 1, compte tenu d'un stemflow préférentiel sur la génératrice d'aval du pseudo-tronc ; (iii) entre 1,20 et 1,65 en aval sur le rang, le lysimètre 3 recevait les transferts de la pluie incidente en début de croissance. En fin de croissance, il était protégé par les feuilles. Ces lysimètres étaient reliés à des tuyaux, installés en profondeur, amenant gravitairement l'eau et les solutés dans des bidons de collecte PVC de 20 l. Les eaux étaient récoltées, pesées et analysées en K^+

et NO_3^- (laboratoire d'analyse INRA Unité AgroPédoClimatique de Guadeloupe) pour l'étude ultérieure des solutés. La Fig. 1 illustre le domaine envisagé pour la modélisation des transferts d'eau pendant une campagne expérimentale de 100 jours.



Le domaine envisagé prenait en compte l'effet de la topographie : le bananier était sur un terrain pentu (14%) et implanté sur un monticule de terre qui se formait avec le temps autour de la base du pseudo-tronc. Les différentes couches de sol - horizon A et B, semelle de labour ont été différenciés et leur propriétés hydrauliques renseignées. Le stemflow et le throughfall, composants de la pluie transmise par le bananier ont été imposés en conditions aux limites supérieures. Des mèches lysimétriques ont été différenciées dans le domaine à 70 cm de profondeur et une condition de suintement a été imposée en bout de ces mèches, les autres parties du domaine étant en drainage libre. Les bords du domaine étaient en condition de flux nul. Le ruissellement n'était pas abordé directement dans HYDRUS 2D : lorsque le flux d'eau infiltré dans le sol était supérieur à la capacité d'infiltration, la condition de flux atmosphérique était transformée en condition de charge ($h=0$) et l'excès d'eau disparaissait.

Une manière de répondre à cette impasse a été d'introduire une couche virtuelle de surface ayant une discrétisation très fine, une conductivité hydraulique élevée et des conditions latérales de suintement, afin de faire écouler le surplus d'eau en surface et d'évaluer les sorties en ruissellement à saturation. Le prélèvement d'eau par la plante a été considéré selon le formalisme de Feddes *et al.* (1978) et la profondeur d'enracinement fixée à une profondeur de 40 cm, les racines étant réparties de manière homogène sous le bananier et au niveau de l'inter-rang (Lecomte, 2003). Les conditions initiales ont été évaluées grâce à des données tensiométriques (Sansoulet, 2004). La variabilité des propriétés hydrauliques du sol était décrite par une distribution suivant une loi log-normale (déviatoin standard = 1) répartie de manière aléatoire.

Une grille d'éléments finis triangulaires a été créée à l'intérieur du domaine grâce à un générateur de grille automatique. La densité de la grille a été évaluée suffisante lorsque la solution convergeait systématiquement et lorsque l'erreur de bilan hydrique était inférieure à 5%. En surface, entre les couches de sol et près de la mèche, des densités de grille élevées étaient nécessaires car les gradients de charge hydraulique étaient importants. La grille d'éléments finis consistait en un total de 2323 nœuds et 4445 éléments pour tout le domaine. Enfin, les discrétisations du temps étaient les suivantes : pas de temps initial : 0.1 jour, pas de temps minium : 0.01 jour et pas de temps maximum : 20 jours.

Transport de K^+ et NO_3^-

Le transport de solutés est classiquement représenté par une équation de transport convectif-dispersif. La convection rend compte du transport macroscopique des solutés qui accompagnent le fluide. La dispersion rend compte à la fois de la diffusion moléculaire, et de la dispersion hydrodynamique.

L'équation générale de transport convectif-dispersif est :

$$\frac{\delta(\rho s)}{\delta t} + \frac{\delta(\theta c)}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left(\left[D \frac{\delta \theta c}{\delta z} \right] - qc \right) - \phi$$

Où : ρ est la densité apparente [ML⁻³],

c la concentration de soluté en solution [ML⁻³],

s la concentration de soluté adsorbé [MM⁻¹],

D le coefficient de dispersion hydrodynamique du soluté [L²T⁻¹]

q le flux d'eau, donné par la loi de Darcy [LT⁻¹] et

ϕ un terme puits/sources [ML⁻³T⁻¹] pour tenir compte d'un prélèvement par la plante et de phénomènes biologiques comme la minéralisation ou l'organisation de l'azote.

La densité apparente a été déterminée expérimentalement (??) alors que les dispersivités longitudinales et transversales du sol fixées à 1 cm et 0.1 cm grâce aux données bibliographiques (Simunek *et al.*, 1999).

Afin de simuler la concentration de soluté en solution, équivalente à l'apport de fertilisant effectué lors des expérimentations, nous avons introduit dans la couche superficielle un stock initial équivalent à 70 kg/ha pour l'azote nitrique et 200 kg/ha pour le potassium, directement solubilisé après la première pluie. Cet apport était homogène sur la parcelle et non au pied du bananier (pratique usuelle) afin de s'affranchir de cette source distribuée et mieux comprendre l'effet de la redistribution de la pluie sur les transferts de solutés.

Les paramètres d'adsorption des solutés ont été calculés à partir des équations alimentant le modèle (Langmuir, Freundlich) à savoir :

$$s = \frac{k_s c^\beta}{1 + \eta c^\beta}$$

Où : s est la concentration du soluté sur la phase solide [MM-1]

c la concentration du soluté dans la phase liquide [M.L-3]

k_s [L3M-1], β [-] et η [L3.M-1] sont des coefficients empiriques.

Les expérimentations « batch » en conditions statiques ont permis d'analyser les isothermes d'adsorption décrivant l'affinité du complexe d'échange pour les deux espèces ioniques considérées, K^+ et NO_3^- versus Ca^{2+} et Cl^- , à différents pH et décrits dans Sansoulet *et al.* (2006). En résumé, 5 g d'échantillons de sol humide, issus de l'horion A et B, ont été saturés avec une solution de 50 ml de 0.2 M $CaCl_2$. Ensuite le pH a été ajusté dans les gammes 4.0 +/-0.1, 5.0 +/-0.1, 6.0 +/-0.1, 7.0 +/-0.1 par addition de 0.05 M HCl ou $Ca(OH)_2$. Les échantillons de sol saturés en Ca et Cl ont été mis en contact avec des solutions de 50 ml à 8 niveaux de concentrations ioniques : 0.001 M, 0.002 M, 0.005 M, 0.007 M, 0.01 M, 0.02 M, 0.05 M and 0.1 M de KNO_3 . La sorption de K^+ and NO_3^- a été évaluée grâce à l'abaissement de concentration de la solution sortante. Nous avons opté pour une représentation en diagramme carré avec la fraction ionique équivalente (FE) du soluté adsorbé fonction de la fraction ionique équivalente du soluté en solution, sachant que $FE_K = \frac{K}{Ca + K}$ et

$$FE_{NO_3} = \frac{NO_3}{Cl + NO_3} \text{ (Delvaux } et al., 1989).$$

Les paramètres de dégradation ou de production d'azote nitrique ont été calculés à partir d'expérimentations au laboratoire mettant en évidence la dynamique de la minéralisation ou de l'organisation de l'azote contenu dans la matière organique du sol. Les paramètres envisagés sont des constantes représentant des coefficients de dégradation de premier ordre (chaîne de dégradation $NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$) dans la phase liquide, solide et gazeuse du sol. La quantité d'azote minéralisé a été évaluée à 80 kg ha^{-1} en 100 jours d'incubation (Sansoulet *et al.*, 2006).

L'absorption de l'azote et du potassium par la plante a été fixée à 70 kg $NO_3-N ha^{-1}$ et 200 kg $K ha^{-1}$ sur les 100 jours d'expérimentation grâce aux données publiées par Martin-Prével *et al.*, 1988. La teneur initiale de chaque soluté dans le sol est appliquée au domaine en tenant compte de la variation de stock selon la profondeur.

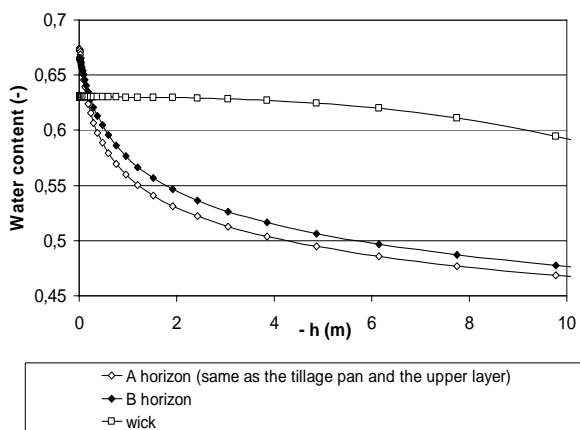
Les coefficients de diffusion moléculaire dans l'eau libre d'une espèce ionique sont référencés dans le Handbook of Chemistry (Weast, 1970) et équivalents à $1.9 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Ces coefficients de diffusion sont multipliés par un facteur de tortuosité, généralement égal à 0,6, selon la formulation de Millington and Quirk (1991).

Afin de résoudre l'équation de transfert, le temps est discrétisé selon le schéma de Crank-Nicholson (semi-implicite). L'espace est discrétisé selon la formulation de Galerkin avec une dispersion artificielle, afin de stabiliser la solution numérique et éviter les oscillations numériques lorsque des fronts de fortes concentrations sont simulés. Cette dispersion artificielle est représentée par un critère de stabilité (Nombre de Peclet * Nombre Courant) fixé à 2 (Perrochet and Berod, 1993).

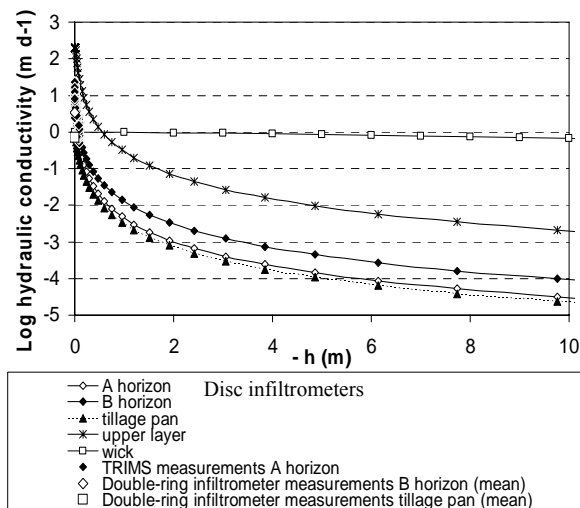
RESULTATS

Evaluation des paramètres de transfert

La Fig. 2a illustre les courbes de rétention $\theta(h)$ du sol - horizons A et B- et de la mèche, ajustées au modèle Van Genuchten (1980).



a



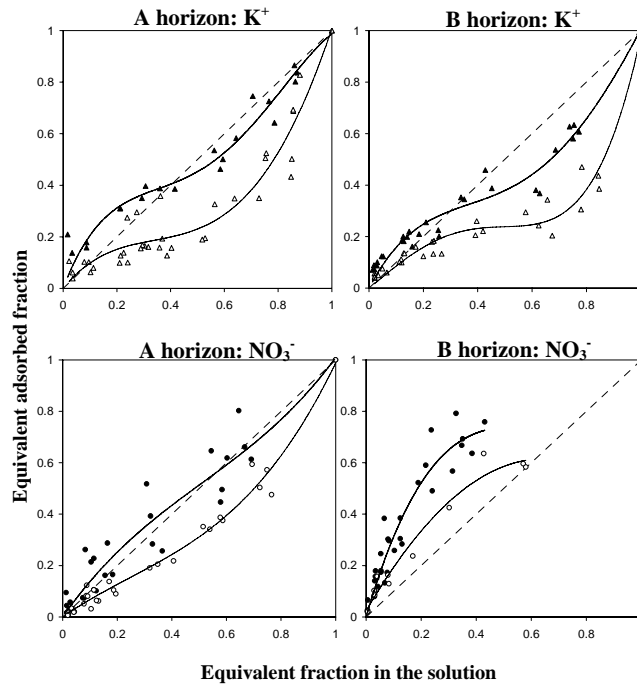
b

Plusieurs échantillons ont été utilisés pour caractériser les propriétés de rétention du sol. Aussi, plusieurs courbes de rétention, plus ou moins distinctes, ont été obtenues. Des plus grandes variations sont apparues dans le traitement des données de l'horizon A (r^2 compris

entre 0.51 et 0.63) que dans l'horizon B (r^2 compris entre 0.83 et 0.93). Les différences de courbes entre les deux horizons sont faibles même si lorsque il n'y a pas saturation, pour un même potentiel, l'horizon B sera plus humide que l'horizon A. La courbe de rétention de la mèche montre la différence de propriétés du matériau originel avec le sol.

La courbe de conductivité hydraulique $k(h)$, obtenue pour les 2 horizons de sol, la semelle de labour et la mèche sont illustrées sur la Fig. 2b. Ces résultats montrent que les infiltromètres à disques donnent des estimations répétables des conductivités hydrauliques à saturation obtenues grâce à l'utilisation d'infiltromètres à doubles anneaux. La couche de surface virtuelle montre bien la conductivité hydraulique élevée. La mèche a une conductivité hydraulique bien supérieure à celles obtenues pour les horizons A et B de sol. La semelle de labour a une conductivité hydraulique à saturation (40 mm h^{-1}) inférieure à celles des deux horizons qu'elle sépare (100 mm h^{-1}).

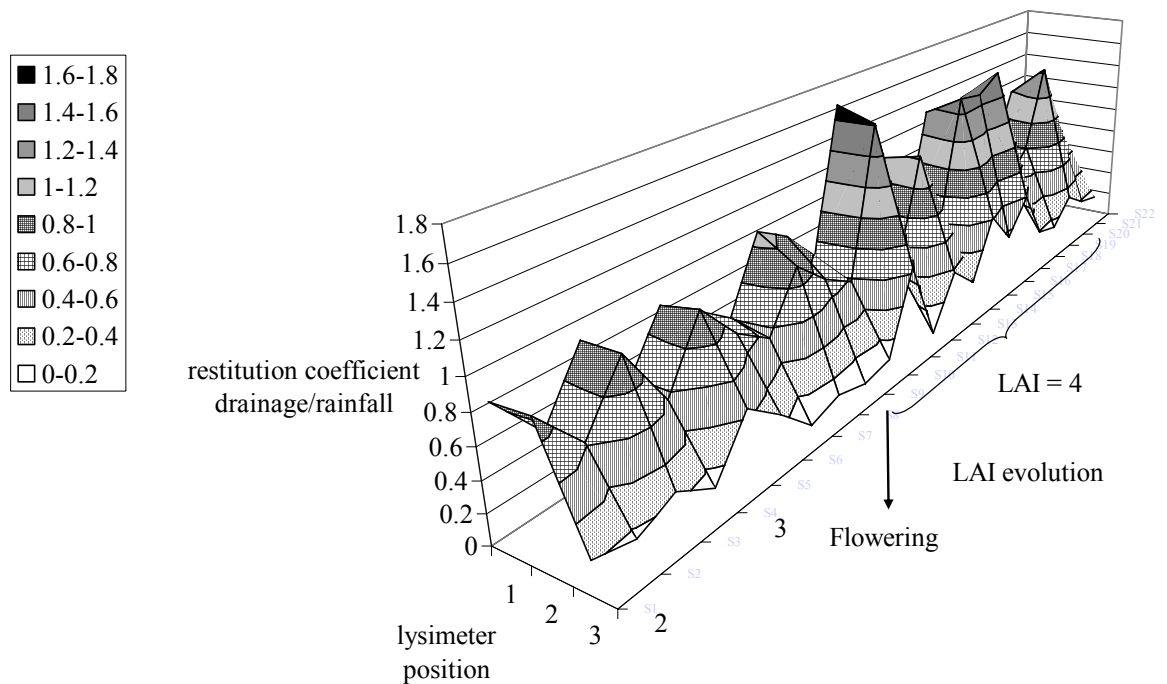
La Fig. 3 montre les fractions ioniques équivalentes de $\text{K}^+ / (\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+})$ et $\text{NO}_3^- / (\text{NO}_3^- + \text{Cl}^-)$ adsorbés en fonction des mêmes fractions dans la solution.; La situation des points par rapport à la droite d'égalité des fractions ioniques adsorbés et en solution témoigne du degré d'affinité du complexe d'échange pour l'ion considéré.



Les horizons A et B ont été divisés en 2 gammes de pH mesuré dans les solutions obtenues après les échanges Ca-K et Cl-NO₃ : au dessous et au dessus d'un pH 5.3 qui correspond au Point de Charge Nulle (ZPC) de l'horizon B. La dispersion des points peut être expliquée par l'hétérogénéité des échantillons de sol humide. L'affinité du complexe d'échange pour K⁺ dans l'horizon A était supérieure à celle de l'horizon B, considérant un pH de la solution du sol inférieur au ZPC de l'horizon B et des ratios K⁺/(K⁺+Ca²⁺) dans la même gamme que celle rencontrée *in situ*, dans le champ (<0.4 dans l'horizon A et compris entre 0.4 et 0.8 dans l'horizon B). Plus le pH était basique, plus le sol avait une affinité pour le calcium dans les 2 horizons. L'affinité du complexe d'échange pour les nitrates était plus important dans l'horizon B que dans l'horizon A et plus le pH était acide, plus le sol avait une affinité pour les nitrates dans les 2 horizons. En dessous du point de charge nulle, l'affinité du complexe d'échange du sol était maximale pour le potassium et les nitrates dans les 2 horizons.

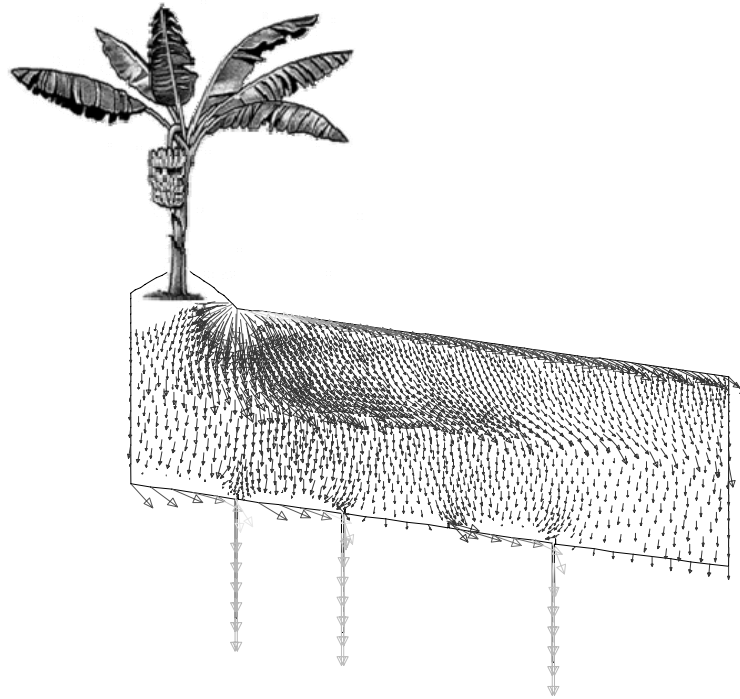
Expérimentation et modélisation

La Fig. 4 montre les ratios drainage / (précipitation –ruissellement) issus des expérimentations évoluant avec le LAI.



Ces ratios sont maximaux sous le pseudo-tronc du bananier et directement en aval, 25 à 70 cm du pseudo-tronc (lysimètres 1 et 2) : le drainage dans cette zone a été de 2 à 3 fois supérieur au drainage mesuré grâce aux lysimètres 3 et 4, entre les rangs, directement soumis au throughfall. La répartition des volumes drainés était fonction du LAI. Après floraison, lorsque le LAI était égal à 4, les ratios drainage / (pluviométrie - ruissellement) étaient supérieurs à 1 et pouvaient atteindre 1.6 sous le pseudo-tronc du bananier. Les ratios les plus importants ont été obtenus avec le lysimètre 2.

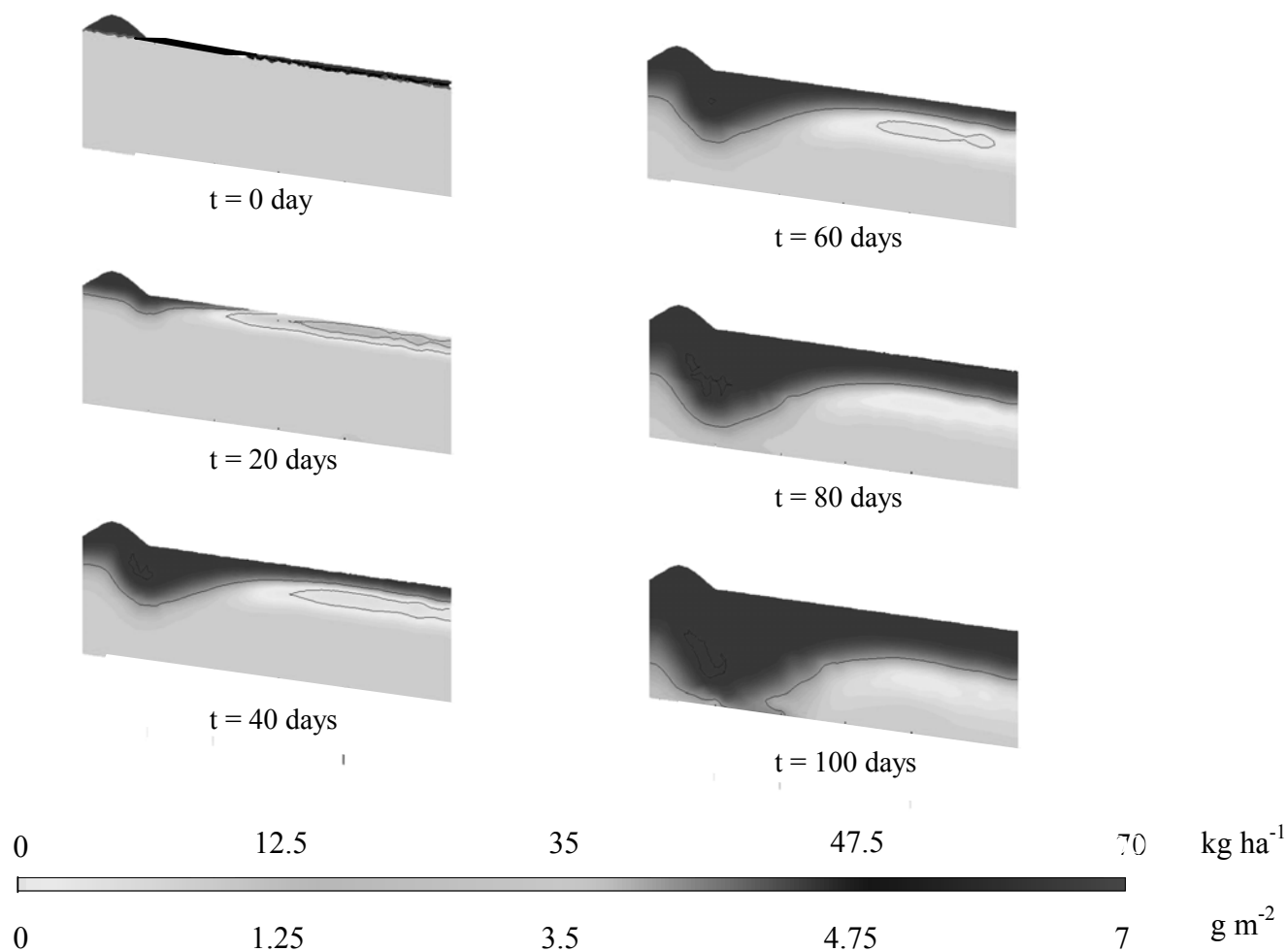
La Fig. 5 montre les vecteurs vitesse de flux illustrant les transferts d'eau en 2 dimensions sous le bananier pendant un évènement pluvieux.



Les vecteurs vitesse indiquent des flux latéraux le long de la pente, en profondeur et particulièrement sous le pseudo-tronc du bananier. Les vecteurs vitesse étaient orientés en diagonale et horizontalement à cause du développement d'une zone saturée en eau au niveau de la semelle de labour. A saturation, le ruissellement a été généré grâce à la présence de la couche virtuelle de surface à conductivité hydraulique très élevée.

La signification des mesures lysimétriques a pu être vérifiée à l'échelle du bananier et de l'inter-rang. L'erreur calculée était inférieure à 4% lorsque nous prenons le défaut du bilan hydrique égal au drainage (drainage = 778 mm, ruissellement = 124 mm, évapotranspiration = 350 mm, pluie mesurée = 1300 mm). Les défauts de bilan du potassium et des nitrates ont été évalués comme équivalents à l'adsorption finale des fertilisants dans le sol (tableau 1). Ces dernières valeurs étaient de 194 kg ha⁻¹ pour les nitrates et de 65 kg ha⁻¹ pour le potassium.

Les simulations de transferts de nitrates sur les 100 jours d'expérimentation sont présentées sur la Fig. 6.



Relativement à un apport de nitrates et potassium équivalent à 70 kg ha^{-1} et 200 kg ha^{-1} , la lixiviation des nitrates était inférieure (30%) à celle du potassium (75%). Les flux sortants montrent clairement l'impact du stemflow sur l'excès de lixiviation de solutés sous le pseudo-tronc et l'impact du throughfall sur les faibles transferts des espèces ioniques issues des fertilisants. Les quantités d'ions lixiviées finales étaient de $42 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ et 301 kg K ha^{-1} après 877 mm drainés sous le pseudo-tronc. Sous les feuilles de bananier, dans le rang, les quantités de nitrates et potassium lixiviés ont atteint $12 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ et 95 kg K ha^{-1} , après 254 mm drainés.

DISCUSSION

Ces recherches avaient pour objectif d'évaluer les transferts hydriques et de solutés (K^+ , NO_3^-) dans un andosol sous bananeraie. Le modèle HYDRUS 2D nous a aidé à établir une méthode d'évaluation des transferts de solutés la plus proche des conditions *in situ*. Ce travail de modélisation a représenté les hétérogénéités des flux d'eau drainés, conditionnés par la redistribution de la pluie par le bananier et simulé les exports d'anions et de cations dans les eaux de drainage, compte tenu d'une adsorption conjointe de cations et d'anions. L'évaluation des paramètres de transport obtenus grâce aux expérimentations de laboratoire et *in situ*, ont permis de renseigner les équations de transport. Les transferts modélisés ont convenablement reproduit le drainage mesuré en plein champ ($r^2 = 0.89$). Selon l'interprétation des simulations, nous attribuons les transferts d'eau sous le pseudo-tronc du bananier, et directement en aval de celui-ci, presque exclusivement au stemflow. Celui-ci est transféré immédiatement en aval du pseudo-tronc sous l'effet de la pente et de la discontinuité des propriétés hydrodynamiques entre l'horizon A et B. Les volumes transférés sont 2 à 3 fois plus importants que ceux mesurés plus en aval de la pente, dans le rang (à 1.2 m du bananier) puisque cette zone ne reçoit que le throughfall. Ces résultats sont en adéquation avec les interprétations des données récoltées *in situ*. Cependant, le modèle surestime légèrement le drainage. Pendant les 100 jours de simulation, l'évaporation d'eau stockée par la canopée n'était pas prise en compte dans le modèle alors qu'elle a été mesurée grâce à un dispositif micrométéorologique (Bassette, 2003) sur les mêmes bananiers.

Notre étude montre clairement que les expérimentations en milieu contrôlée (batch) évaluant l'adsorption de K^+ et NO_3^- dans un andosol étaient indispensables pour comprendre la lixiviation des nitrates et du potassium. Ces dernières dynamiques ont été toutes deux retardées par la Capacité d'Echange Anionique et Cationique. Dans des conditions acides, l'horizon B, avec une grande proportion d'allophane, a préférentiellement développé une

affinité pour les nitrates. Au contraire, l'horizon A, *via* les nombreux sites organiques, a plutôt exhibé une affinité pour le potassium, considérant un pH de la solution du sol inférieur au ZPC de l'horizon B et des ratios $K^+/(K^++Ca^{2+})$ dans la même gamme que celle rencontrée *in situ* (<0.4 dans l'horizon A et compris entre 0.4 et 0.8 dans l'horizon B). Ces résultats confirment les travaux publiés par Delvaux *et al.* (1989) sur l'adsorption du potassium dans le même andosol. Malgré cette adsorption conjointe des ions, le stemflow abondant a rapidement contrôlé la lixiviation des fertilisants depuis la couche de surface labourée jusqu'à la couche profonde acide, où les racines sont éparses. En effet, en dépit de la Capacité d'Echange Anionique, les nitrates lixiviés étaient 3 fois plus importants sous le pseudo-tronc que dans le rang. De la même manière, la quantité de potassium lixivié sous le pseudo-tronc était 1.5 fois supérieure à l'apport fertilisant, ce qui signifie qu'une part du niveau élevé de potassium initial contenu dans l'andosol a été également lixiviée sous le pseudo-tronc (89 kg ha⁻¹ sur les 232 kg ha⁻¹ initiaux). Juste après l'apport fertilisant, la lixiviation du potassium a été retardée probablement parce que la matière organique de l'horizon A a développé une affinité plus élevée pour le potassium. Ceci peut s'expliquer par une profondeur de lysimètre à 70 centimètres et un horizon A prédominant d'environ 40 centimètres au-dessus du lysimètre. D'ailleurs, ce retard a juste été observé sous le pseudo-tronc, probablement parce que la capacité initiale d'échange cationique n'était pas saturée avec du potassium : le stemflow antécédent avait probablement lixivié une partie conséquente du potassium restant des cycles précédents. En conséquence, sous le pseudo-tronc, le potassium issu de l'engrais n'était pas disponible sous le pseudo-tronc à la fin de l'expérimentation. Cependant, la distribution de racines était presque identique sous le pseudo-tronc et dans le rang, jusqu'à la profondeur de 40 centimètres (Lecompte, 2003) de sorte que le bananier a probablement pu bénéficier des engrais fournis uniformément sur la parcelle. En effet, relativement à l'apport, 53% de potassium n'a pas été lixivié entre les rangs. Néanmoins, la part finale de potassium

adsorbé est restée faible (65 kg ha^{-1}) dans le rang. On peut ainsi conclure qu'une grande fraction du potassium adsorbé dans le rang a contribué à répondre à l'exigence élevée des bananiers pour le potassium ($200 \text{ kilogrammes ha}^{-1}$ pendant 100 jours).

Ces derniers résultats remettent en cause le concept de la localisation d'engrais au pied du pseudo-tronc car dans cette condition : (i) la fraction équivalente $K^+/(K^++Ca^{2+})$ serait plus haute, l'adsorption du potassium dans le sol plus faible et les pertes par lixiviation plus importantes ; (ii) un stemflow abondant engendrerait la lixiviation précoce des engrais ; (iii) les stocks de K^+ et NO_3^- sont plus importants entre les rangs que sous le pseudo-tronc.

CONCLUSION

Les simulations des dynamiques de lixiviation des nitrates et du potassium dans un andosol, calibrées par des paramètres mesurés de transfert hydrauliques et d'adsorption des ions, ont été toutes deux retardées par la Capacité d'Echange Anionique et Cationique. Dans des conditions acides, l'horizon B, avec une grande proportion d'allophane, a préférentiellement développé une affinité pour les nitrates. Au contraire, l'horizon A, *via* les nombreux sites organiques, a plutôt exhibé une affinité pour le potassium. Malgré ces capacités d'échange, les pertes des ions K^+ et NO_3^- au pied du bananier suite à l'infiltration du stemflow étaient 2 à 3 fois supérieures sous le pseudo-tronc du bananier que dans le rang puisque cette zone recevait le throughfall. Le concept de la localisation d'engrais au pied du pseudo-tronc est à redéfinir. Nous recommandons que d'autres simulations soient engagées pour évaluer quelles seraient les incidences de plusieurs scénarii sur la lixiviation des engrais (i) différent scénarii de transferts d'eau : avec ou sans semelle de labour, variation de la conductivité hydraulique à saturation en fonction du tassement du sol ou de la prospection des racines, croissance du bananier et donc stemflow croissant ; (ii) différent scénarii des transferts de solutés : localisation des engrais au pied du bananier, chaulage des parcelles entraînant l'augmentation du pH et des pertes par lixiviation.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé grâce à une bourse Ministérielle de l'Ecole Doctorale ABIES (Institut National Agronomique Paris Grignon) et des financements de l'Union Européenne. Nous souhaitons exprimer nos remerciements à Jacques André, Andèves Mulciba, Christian Palmier, techniciens de la recherche, pour leurs efforts méticuleux et leur diligence lors des expérimentations.

BIBLIOGRAPHIE

- Bassette, C. 2005.** Modélisation 3-D de l'interception de la pluie par le bananier: effets de caractéristiques physiques du couvert sur les flux d'eau et de d'énergie cinétique de la pluie transmis au sol. Thesis, pp. 194. Université des Antilles-Guyane, Pointe-à-Pitre.
- Belmans, C., J. G. Wesseling, and R. A. Feddes. 1983.** Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology*. 63: 271-286.
- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussièrre, Y. M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J. P. Gaudillère, F. Maraux, F. B. Seguin, and H. Sinoquet. 2003.** An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*. 18: 309-332.
- Bussièrre, F., F. Solmon, and A. Fouere. 2002.** Implementation and evaluation of DROP, a model for the simulation of rainfall distribution below plants described in 3D. *Agronomie*. 22: 93-103.
- Chabot, R., S. Bouarfa, D. Zimmer, C. Chaumont, and C. Duprez. 2002.** Sugarcane transpiration with shallow water-table: sap flow measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 54: 17-36.
- Delvaux, B., J. E. Dufey, L. Vielvoye, and A. J. Herbillon. 1989.** Potassium exchange behaviour in a weathering sequence of volcanic ash soils. *Soil Science Society of America Journal* 53: 1679-1684.
- Feddes, R. A., P. J. Kowalik, and H. Zarandny. 1978.** Simulation of field water use and crop yield, John Wiley & Sons, New-York, NY.
- Godefroy, J., and M. Dormoy. 1988.** Mineral fertilizer element dynamics in the "soil-banana-climate" complex. Application to the programming of fertilization. III. The case of andosols. *Fruits (Paris)*. 43: 263-267.
- Lecompte, F., H. Ozier-Lafontaine, and L. Pagès. 2003.** An analysis of growth rates and directions of growth of primary roots of field-grown banana trees in an andisol at three levels of soil compaction. *Agronomie* 23: 209-218.
- Levia, D. F., and S. R. Herwitz. 2000.** Physical properties of water in relation to stemflow leachate dynamics: implications for nutrient cycling. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*. 30: 662-666.
- Mohrath, D., L. Bruckler, P. Bertuzzi, J. C. Gaudu, and M. Bourlet. 1997.** Error analysis of an evaporation method for determining hydrodynamic properties in unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal*. 61: 725-735.
- Mualem, Y. 1976.** A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturatedporous media. *Water Resources Research*. 12: 513-522.

- Pang, L., M. E. Close, J. P. C. Watt, and K. W. Vincent. 2000.** Simulation of picloram, atrazine, and simazine leaching through two New Zealand soils and into groundwater using HYDRUS-2D. *Journal of Contaminant Hydrology* 44: 19-46.
- Persicani, D., G. Gasparetti, P. Siro, and M. Bonvini. 1995.** Measurement and simulation of atrazine and alachlor leaching into two field soils. *Journal of Contaminant Hydrology*. 19: 127-144.
- Sansoulet, J. 2004.** Transferts d'eau et de solutés dans un andosol sous culture bananière. Incidence du fonctionnement hydrologique distribué et de la manipulation des propriétés physico-chimiques du sol sur la gestion des flux sortants de solutés ioniques. Bilan des travaux doctoraux, pp. 29. Institut National de Recherche Agronomique (INRA), Pointe à Pitre.
- Sansoulet, J., Y. M. Cabidoche, and Cattan. P. 2006.** Exchange and transport of nitrate and potassium in an andosol with variable charges: Experimental studies under Banana plants in the French West Indies. *European Journal of Soil Sciences (Special Issue)* (in press).
- Simunek, J., and J. A. d. Vos. 1999.** Inverse optimization, calibration and validation of simulation models at the field scale, Modelling of transport processes in soils at various scales in time and space. International Workshop of EurAgEng's Field of Interest on Soil and Water, Leuven, Belgium, 24-26 November 1999, Wageningen Pers, Wageningen, Netherlands.
- Simunek, J., O. Wendroth, and M. T. v. Genuchten. 1998.** Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*. 62: 894–905.
- Simunek, J., K. Huang, M. Sejna, and M. T. v. Genuchten. 1999.** The HYDRUS-2D Software Package for Simulating Two-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 2.0. IGWMC-TPS-53, Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO. 251 pp.
- Tamari, S., L. Bruckler, J. M. Halbertsma, and C. J. 1993.** A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Science Society of America Journal*. 57: 642–651.
- Van Genuchten, M. T. 1980.** A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44: 892–898.
- Ventrella, D., B. P. Mohanty, J. Simunek, N. Losavio, and M. T. v. Genuchten. 2000.** Water and chloride transport in a fine-textured soil: field experiments and modeling. *Soil Science*. 165: 624-631.
- Wada, K. 1989.** Allophane and imogolite, pp. 1051-1087. *In* S. S. S. o. A. Inc. [ed.], *Minerals in Soil Environments*, SSSA Book Series, no. 1., Madison, WI 53711, USA.
- Weast, R. C. 1970.** Handbook of Chemistry and Physics, 51 ed. Welter LM and McKee. Chemical Rubber CO-F140-1. Cleveland, Ohio.
- Wind, G. P. 1968.** Capillary conductivity data estimated by a simple method., pp. 181-191, P.E. Rijtema and H. Wassink (ed.) *Water in the unsaturated zone*. Vol. 1. Proc. Wageningen Symp. June 1966. Int. Assoc. Scientific Hydrol., Gentbrugge, Belgium.

Liste des tableaux

	Initial pool	Supply	Plant absorption	Run-off	Leaching	Net mineralisation	Final soil adsorption
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
NO₃-N	136	70	70	2	20	80	194
K	232	200	200	9	158	-	65

Tableau 1. Différents éléments du bilan des nitrates et du potassium à l'échelle de la parcelle.

Liste des Figures

Fig. 1. Domaine de simulation, grille d'éléments finis, conditions aux limites

Fig. 2. Courbe de rétention et courbe de conductivité hydraulique des différents éléments du domaine (horizon A et B, semelle de labour, couche de surface, mèche).

Fig. 3. Fractions ioniques équivalentes de $K^+/(K^++Ca^{2+})$ et $NO_3^-/(NO_3^-+Cl^-)$ adsorbés sur la phase solide du sol (meq 100g)/(meq 100g) en fonction de ces mêmes fractions dans la solution (meq L^{-1})/(meq L^{-1}) – Horizon A et N. Les symboles blancs représentent un $pH < 5.3$ et les noirs un $pH > 5.3$

Fig. 4. Ratios drainage/(précipitation- ruissellement) en fonction du LAI dans les lysimètres 1, 2 et 3.

Fig. 5. Vecteurs vitesse indiquant la direction et l'importance des flux en 2 dimensions dans l'andosol sous bananier après un évènement pluvieux.

Fig. 6. Simulation sur 100 jours des transferts de nitrates dans l'andosol sous bananier.