

# **D**ispositif expérimental pour le suivi de l'évolution physico-chimique des sols et la détermination de leurs paramètres hydrodynamiques au laboratoire

Jean-Luc MAEGHT\*, Claude HAMMECKER\*

\* IRD, Hann BP 1386, Dakar, Sénégal

## **Résumé**

Dispositif expérimental pour le suivi de l'évolution physico-chimique des sols et la détermination de leurs paramètres hydrodynamiques au laboratoire. Depuis plus de 50 ans, le nombre de périmètres irrigués se développent constamment en zone sahélienne. Cependant, la pratique de l'irrigation à grande échelle n'est pas sans danger. Elle peut conduire à modifier le fonctionnement des sols et ainsi entraîner des phénomènes de dégradation. Ceux-ci peuvent avoir des impacts environnementaux et économiques négatifs importants. Il est donc nécessaire de pouvoir prédire l'évolution des sols à long terme.

Pour réaliser ce type de prévision, on utilise des modèles numériques. Ceux-ci ont besoin de données précises sur les paramètres hydrodynamiques des sols. Ces données peuvent être obtenues sur le terrain, mais les dispositifs sont difficiles à mettre en place et les études sont lentes. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de mettre en place un dispositif de mesure en laboratoire qui nous permet de reproduire les différentes phases d'évolution des sols tout en contrôlant un maximum de paramètres.

Nous avons donc créé et mis en place un banc de colonnes de sol composé de monolithes de sol non remanié de 60 cm de haut et 23 cm de diamètre. Ces monolithes sont équipés de dispositifs permettant de simuler des situations réelles et de reproduire de manière accélérée plusieurs cycles de culture. Un système d'enregistrement automatique permet de réaliser l'acquisition des données en continu.

Ce dispositif permet donc l'obtention des paramètres nécessaires au calage des modèles et à la validation des simulations. Le banc de colonne de sol a déjà été utilisé avec succès dans plusieurs expérimentations sur des sols du Sénégal et du Mali. Il s'agit notamment d'expériences de traçage par injection d'eau de faciès contrasté. D'autres expériences sont en cours sur la simulation de nappe sodisante et pour des mesures de gonflement retrait sur sol argileux. D'autres phénomènes peuvent également être étudiés avec notre dispositif dans les domaines du transferts des polluants et de la microbiologie des sols.

## **Abstract**

A new experimental system for monitoring the geochemical changes in soil and to determine soil hydrodynamic parameters in the laboratory. The number of irrigated parcels in sub-Saharan Africa has been steadily increasing for over 50 years. However, there are risks related to large-scale irrigation. It can lead to modifications in the way the soil functions thereby causing degradation. This can have significant negative environmental and economic impacts. Prediction of long-term changes in the soil is therefore essential.

Computerised models are used for this type of forecasting. These require precise data on the hydrodynamic parameters of the soil. These data can be obtained in the field, however the equipment is difficult to set up and such studies take a long time. This is why we chose to set up a system for measuring soil activity in the laboratory, which enables us to reproduce the various phases in the evolution of the soil while controlling a maximum number of parameters.

We have therefore developed a system, which consists of a bank of soil cores made up of monoliths of undisturbed soil 60 cm in height and 23 cm in diameter. These monoliths were fitted with various devices, which make it possible to simulate real conditions and reproduce, several cropping cycles within a short space of time. Data is continuously collected with an automatic recording system.

The parameters required for fitting the model and testing simulations can therefore be obtained using this system. The bank of soil cores has already been used successfully in several experiments to study soils in Senegal and Mali, in particular, experiments on tracing contrasted facies by water injection. Other experiments on the sodifying layer as well as measuring swelling and shrinkage in clayey soils are in progress. Other phenomena can also be studied with our system in the areas of transport of pollutants and soil microbiology.

## Introduction

L'irrigation des terres arables se développe constamment pour répondre aux besoins alimentaires des populations en constante croissance. Depuis ces 50 dernières années, les surfaces irriguées ont pratiquement triplé dans le monde, passant de 92 à 265 millions d'hectares (Szablocs, 1994). Selon les estimations de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO Rome 22-03-1999), l'agriculture irriguée fournit aujourd'hui 40 % de la production alimentaire mondiale et devrait atteindre les 60 % à l'échéance de 2025. Pour autant, les ressources en eau ne sont malheureusement pas inépuisables et notamment dans les pays arides où le développement des systèmes irrigués est important (Cheverry et Robert, 1998). Il existe cependant des pistes pour améliorer la rentabilité de l'eau utilisée pour l'irrigation (Maeght *et al.*, 2002).

Dans les pays à faible pluviométrie, comme les pays sahéliens, l'irrigation des cultures est un outil indispensable à l'amélioration des capacités de production. Cependant, elle représente un coût d'investissement et d'exploitation très important notamment pour l'aménagement des périmètres irrigués et des réseaux hydroélectriques. Dans de nombreux cas, la mise en place de ces systèmes se fait grâce à l'aide de la coopération internationale. Ces investissements ne sont donc rentables que s'ils peuvent être amortis dans la durée à travers l'exploitation à long terme des périmètres irrigués. Il est donc nécessaire de pouvoir prédire l'évolution à long terme des sols à l'aide de modèle de simulation en fonction des techniques d'irrigation car les enjeux sont importants tant sur le plan socio-économique qu'environnemental.

Il est reconnu que l'irrigation à grande échelle n'est pas sans danger. Elle modifie l'équilibre naturel des sols et peut entraîner une baisse de la fertilité liée à des processus de salinisation. Ces risques de dégradation sont d'autant plus importants que les paysans n'ont pas tous acquis une bonne maîtrise de l'irrigation, les transferts de connaissance s'étant souvent faits très rapidement (Cheverry et Bourrié, 1988). Nous observons que plus de 20 % des terres cultivées au niveau mondial sont affectées par des problèmes de dégradation liés à la salinisation (Tyagi, 1996). De nombreux exemples de dégradation des sols existent, notamment en zone aride comme au Pakistan (Tablet, 1999) ou au Mali (Bertrand *et al.*, 1993). Des études sont menées dans les différents pays sur les conséquences de l'irrigation sur les sols, comme dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal (Boivin *et al.*, 1998). Si les effets des différentes formes de salinisation sont connus, les connaissances sur les processus physico-chimiques restent parfois insuffisantes pour pouvoir décrire valablement les phénomènes et les simuler avec l'aide de modèles.

En effet, si les modèles cherchent à prévoir l'évolution à long terme des sols, il y a souvent des écarts entre les résultats qu'ils donnent et la réalité observé sur le terrain. Ces écarts s'expliquent notamment par une connaissance incomplète de certains processus et les difficultés d'obtention de valeurs de calage des paramètres utilisés dans les équations. (Vauclin, 1994). Ces informations sont indispensables pour pouvoir prédire convenablement l'évolution des sols en fonction des techniques d'irrigation et proposer une gestion alternative de l'eau si nécessaire.

Pour répondre à ces besoins, nous avons créé et mis en place un dispositif expérimental pour le suivi de l'évolution physico-chimique des sols et la détermination de leurs paramètres hydrodynamiques au laboratoire. Nous avons fait ce choix afin de pouvoir travailler dans un environnement contrôlé et de maîtriser un maximum de paramètres lors des expérimentations d'irrigation et de séchage.

## Matériel et méthode

Nous travaillons avec différents types de sols en fonction des terrains d'étude et des préoccupations de nos partenaires. Il s'agit de vertisol de la moyenne vallée du fleuve Sénégal et de sols provenant de l'office du Niger au Mali dont un sol de levée sableuse. Pour ce dernier, les travaux ont été faits dans le cadre d'une collaboration avec le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD).

Le prélèvement du monolithe de sol doit se faire très soigneusement afin de perturber au minimum l'échantillon de sol et qu'il soit représentatif du milieu où il a été prélevé. Nous avons choisi de prélever des monolithes de sol de 23 cm de diamètre et 60 cm de hauteur afin qu'ils soient représentatifs de l'horizon superficiel du sol prospecté par les racines des plantes.

La technique de prélèvement consiste à faire pénétrer progressivement dans le sol un cylindre en PVC muni d'un emporte-pièce. Nous avons placé une gaine en plastique à l'intérieur du cylindre de prélèvement. L'intérieur de la gaine en plastique a été enduit de silicone (aérosol SILI-D antifriction) afin de limiter les frottements et éviter les écoulements préférentiels latéraux lors des futures expérimentations. Le sol a été préalablement humidifié afin de faciliter la pénétration du cylindre. Après chaque enfoncement d'une profondeur d'environ 10 cm le sol est dégagé tout autour du cylindre de prélèvement afin de faciliter sa progression en profondeur. Lorsque le cylindre est totalement enfoncé, nous obtenons une fosse avec en son centre le monolithe prêt à être cisailé à la base (figure 1).

**Figure1. Schéma de principe de prélèvement**

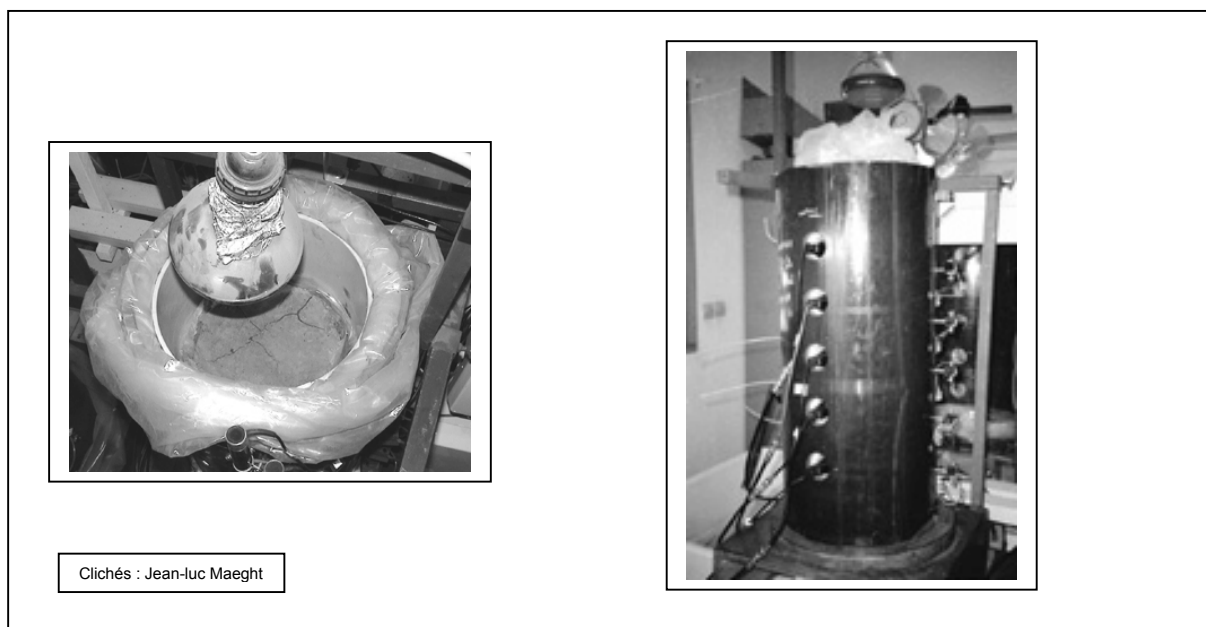


Les colonnes sont ensuite transportées dans des caisses capitonnées jusqu'au laboratoire.

## La mise en place au laboratoire

Chaque monolithe de sol est ensuite placé dans un nouveau cylindre en PVC que nous appellerons colonne de mesure. Celles-ci sont d'un diamètre supérieur au cylindre de prélèvement. Chaque colonne est tapissée d'une mousse collée sur les parois et une nouvelle gaine en plastique. L'intérieur de la gaine en plastique est également recouvert de silicone pour faciliter la mise en place. La mousse est plaquée à l'intérieur du cylindre en PVC à l'aide d'un « chausse-pieds » afin de permettre à la colonne de mesure de venir prendre progressivement la place du tube de prélèvement. Ensuite, le chausse-pieds est retiré verticalement et la mousse vient plaquer la gaine plastique contre la paroi du monolithe. Ensuite, chaque colonne de mesures contenant un monolithe est placée sur un support. La face inférieure de la colonne de sol repose sur une plaque en aluminium peinte recouverte d'une toile tissée. Cette plaque est striée afin de diriger les futures écoulements vers l'orifice central sous lequel pourra être placé un récipient. Enfin, chaque colonne est déposée dans la salle du laboratoire qui est contrôlée en hygrométrie et en température (figure 2).

**Figure 2. Vue de dessus et vue d'ensemble d'une colonne en place**



Après la mise en place, chaque colonne est équipée en appareillage de mesures standards et en capteurs spécifiques en fonction des objectifs d'expérimentations.

Chaque colonne est équipée d'un dispositif de séchage ou d'infiltration qui nous permet de reproduire au laboratoire les phases successives d'humectation et de séchage observées au champs.

Le dispositif de séchage se compose d'un petit ventilateur et d'une lampe chauffante infrarouge. Une régulation de la tension d'alimentation de la lampe nous permet de gérer l'intensité de l'évaporation. Nous pouvons atteindre une évaporation supérieure à 4 cm par jour en fonction des expérimentations. L'ensemble des capteurs sont calibrés lors de leur mise en place.

Dans tous les cas, nous cherchons à déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du sol  $K(\theta)$  et  $h(\theta)$ .

La teneur en eau volumique ( $\theta$ ) sera déterminée par la technique de la réflectométrie temporelle ou TDR. Son suivi régulier permettra d'évaluer l'évaporation et l'infiltration. Nous utilisons le matériel de la société GABEL corporation (ESI), model Moisture Point MP-917

avec des sondes de type Z. (W.R. Hook et al, 1992). Nous avons apporté des modifications à ce type de sonde pour son utilisation dans les sols argileux.

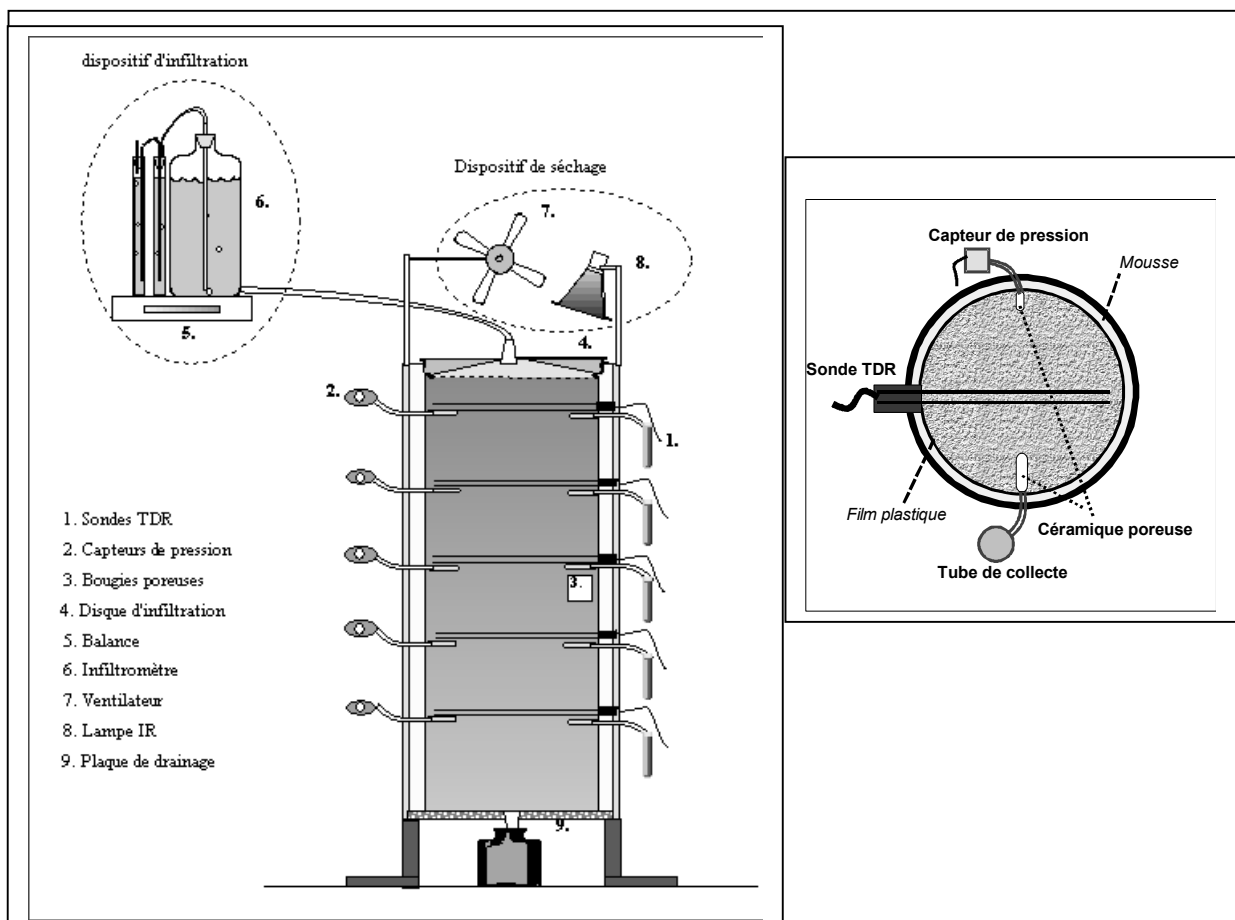
Les mesures du potentiel matriciel se font par l'intermédiaire de capteurs de tension de la marque Honeywell acceptant une gamme de pression de plus ou moins 1 bar. Une attention particulière doit être apportée à la stabilité de l'alimentation électrique et aux variations de température, même si ces capteurs sont vendus comme étant compensés en température. Chaque capteur est relié par un capillaire à une céramique poreuse de type SDEC 230 ayant une pression d'entrée d'air de 1.5 bar.

La conductivité hydraulique (K) est calculée à partir des mesures d'infiltration en fonctions du temps. Les données sont recueillies par une balance qui mesure la perte de poids d'un vase de Mariotte. Celui-ci alimente un disque d'infiltration placé à la surface du sol et nous permet de contrôler la charge de pression au sommet de la colonne de sol.

Le bilan chimique se fait par le suivi de la solution du sol qui est extraite par l'intermédiaire de céramiques poreuses SDEC placées en vis-à-vis par rapport aux bougies des capteurs de tension. L'extraction est commandée automatiquement par l'intermédiaire d'une minuterie qui déclenche une pompe à vide. Cette pompe exerce une dépression de l'ordre de 650 millibars. Nous réalisons des cycles de pompage courts répartis sur 24 heures, afin de ne pas trop perturber le fonctionnement hydrique des colonnes de sol.

Un ensemble d'appareillages interconnectés composé de multiplexeurs, centrale d'acquisition et micro-ordinateur permet de recueillir et de classer l'ensemble des données. L'acquisition des données se fait de manière automatique 24 heures sur 24 au rythme choisi en fonction des expérimentations. Toutes les données sont sauvegardées sur disque dur accessible par le réseau. La figure 3. illustre l'ensemble des appareillages qui équipent les colonnes de sol.

**Figure 3. Schéma de la disposition de l'ensemble des appareils de mesures**

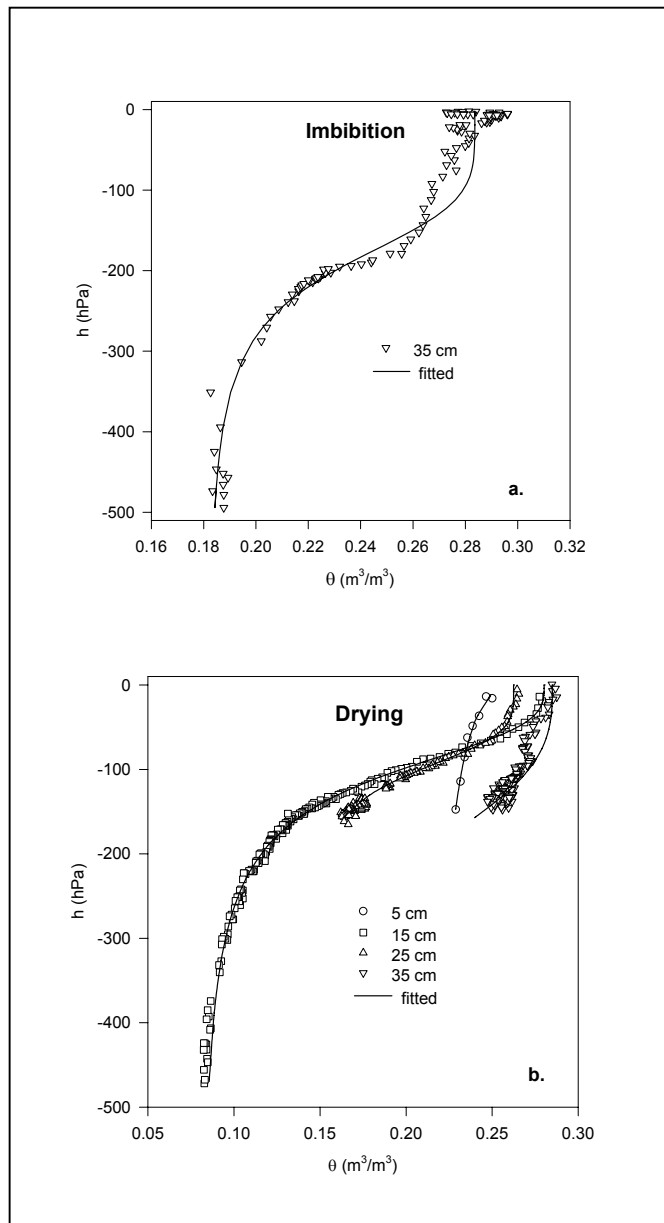


## Résultat et discussions

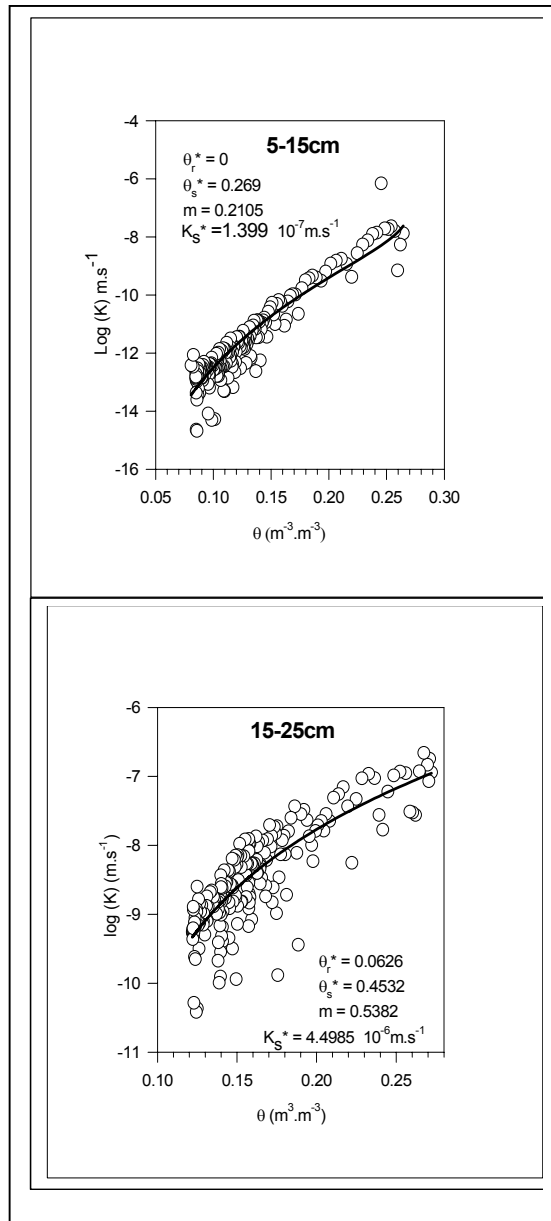
Le dispositif expérimental de colonnes de sol a permis d'effectuer plusieurs expérimentations (Camara, 1999 ; Condom, 2000). Nous avons des résultats, notamment sur l'amélioration des connaissances des processus hydrodynamiques et les transferts hydriques et salins. Il permet également d'obtenir des paramètres de calage pour des modèles couplés des processus hydro-géologiques (Condom *et al.*, 2001 ).

Nous présentons sur les figures 4, 5 et 6 des exemples de résultats obtenus dans le cadre d'expérimentation de modélisation de transferts d'eau.

**Figure 4. Courbe de rétention pour l'humectation (a.) et le séchage (b.)**

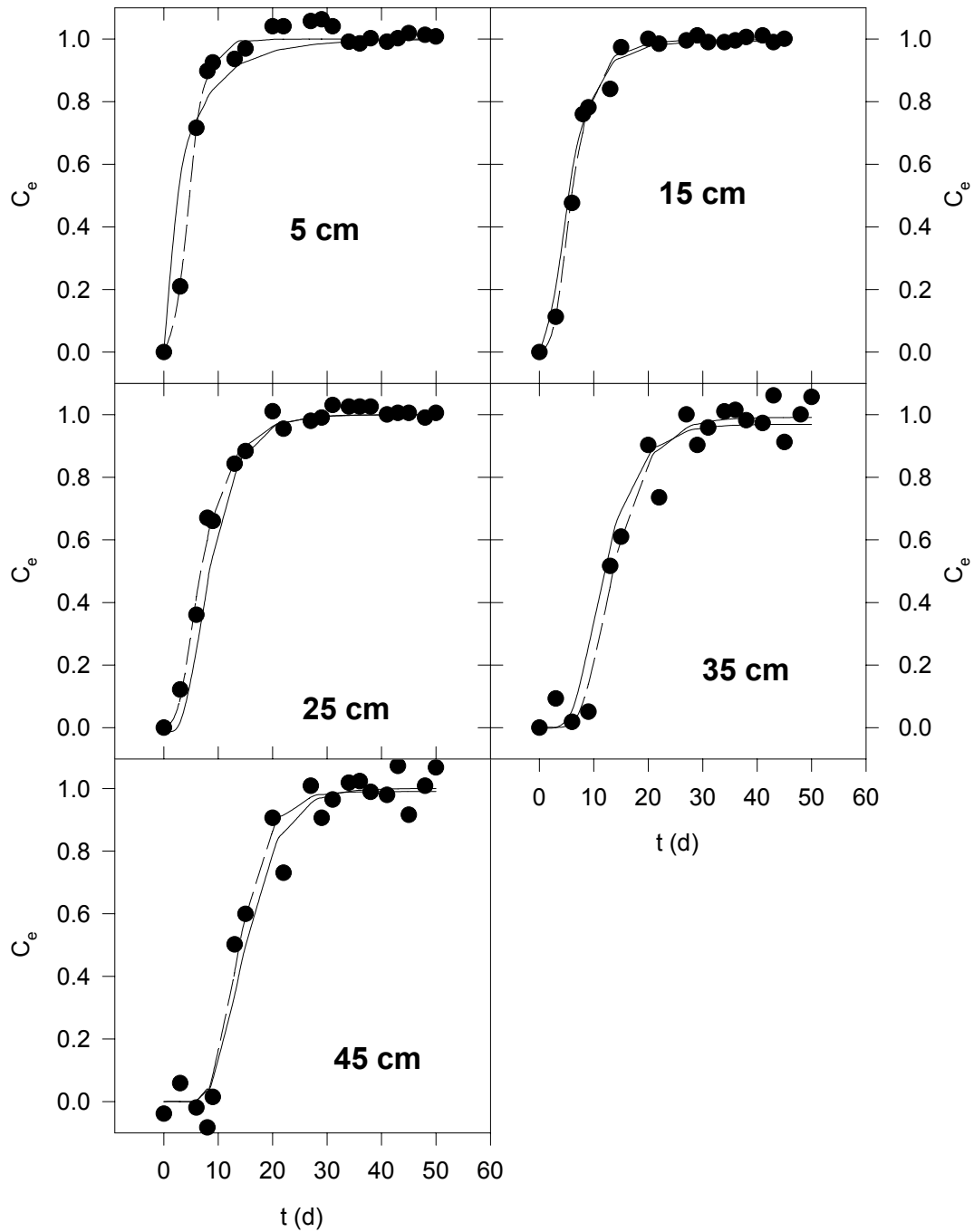


**Figure 5. Courbe de conductivité hydraulique pour différentes profondeurs, obtenue pendant la phase de séchage, et ajustée avec les paramètres hydrauliques de vanGenuchten**





**Figure 6. Courbes expérimentales et modélisées déterminées par les mesures de conductivité électrique de la solution du sol à différentes profondeurs en fonction du temps en jours. Les données expérimentales sont représentées par les points ●, les courbes ajustés représentés par les lignes continues (—) pour l'équilibre non-réactif BCE, et le modèle réactif avec facteur de retardement est représenté par une ligne en pointillés (-)**





Des travaux sont en cours actuellement sur l'étude des phénomènes de gonflement-retrait sur monolithe de sol argileux en collaboration avec le laboratoire d'étude des Transferts en hydrologie et environnement (LTHE) de Grenoble. Des capteurs de déplacement ont été ajoutés au dispositif initial pour réaliser cette étude. Des expérimentations sont également réalisées pour simuler une alcalinisation du sol par la présence d'une nappe artificielle. Nous cherchons à étudier l'altération des propriétés hydrodynamiques d'une colonne de sol dont nous avons fait l'étude complète au préalable, afin de comparer les différents paramètres. Le dispositif de mesure mis en place permet également d'envisager des études dans d'autres domaines, comme le transfert de polluants et les pesticides.

D'une manière générale, les mesures en laboratoire sur de gros volumes de sol offrent une bonne représentativité des paramètres étudiés comparativement à des échantillons plus petits que l'on peut utiliser avec d'autres techniques. Par ailleurs, ce dispositif permet de réaliser des expérimentations qui seraient difficiles à mettre en place sur le terrain, tout en gardant une bonne représentativité. En contrepartie, chaque expérimentation doit se faire sur une durée assez longue et donc doit être soigneusement planifiée pour garantir l'acquisition de données de qualité. Le dispositif est bien adapté à l'étude de tout type de sol, même très argileux. Cependant la technique de mesure TDR a demandé certaines adaptations pour répondre à nos attentes et des améliorations dans ce domaine devraient être encore possibles.

Le banc de colonnes de sol représente une mobilisation relativement importante en termes de financement et de connaissances. Cet investissement se justifie au travers des possibilités d'évolution qu'il offre et de la diversité des études qu'il permet de réaliser dans plusieurs champs de recherche. Il est donc un bon outil de collaboration avec des partenaires d'autres institutions qui travaillent sur des problématiques proches.

Cet outil a démontré ses capacités à fournir des paramètres nécessaires au calage des modèles et à la validation des simulations. L'étude sur monolithes de sol non remanié en laboratoire est donc un moyen privilégié pour appréhender l'évolution des sols, notamment sur le plan hydrodynamique et géochimique.

## Bibliographie

CAMARA A., 1999. Etude sur la quantification des bilans hydriques sur des colonnes de sol et la détermination des caractéristiques physiques. Rapport de stage d'ingénieur de l'école supérieure polytechnique de Thiès Sénégal . 45 p.

CONDOM N. 2000. Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Thèse de doctorat de l'école nationale agronomique de Montpellier.

CONDOM N., LAFOLIE F., HAMMECKER C., MAEGHT J.L., MARLET S., VALLES V. 2001. Hydrogeochemical modelling of soil salinisation, alkalisation and sodification : presentation and calibration of the PASTIS model. IRD ex ORSTOM International symposium, Soil structure, water and solute transport.

BERTRAND R., KEITA B. et N'DIAYE K., 1993. La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud-sahariennes (cas de l'office du Niger). Cahiers Agriculture, 2, p 318-329.

BOIVIN P., FAVRE F., MAEGHT J.L., 1998. Soils of the Senegal river middle valley : properties and evolution under irrigation. EGS vol5, pp 235-246.

CHEVERRY C., BOURRIE G., 1988. la salinisation des sols. In Sol : interface fragile, Stengel P., Gelins S. coord, coédition INRA et NATHAN, 222p.

CHEVERRY C., ROBERT M., 1998. La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays du sud de la Méditerranée ? Etude et Gestion des Sols, 5, 4, 217-225.

FAO, 1999 journée mondiale de l'eau internet : <http://www.waterlink.net/fr/fao11.htm>

MAEGHT J.L., CAUZID C., HAMMECKER C., 2002. Vers une meilleure rentabilité de l'eau d'irrigation. Sciences au Sud, n° 13 janvier/février 2002 p. 11

- SZABLOCKS I., 1994. Prospects of soil salinity for the 21<sup>st</sup>. century. Acaoulco, Mexique. Trans. 15<sup>th</sup> world congresses of soil science ; vol 1, 123-141.
- TABLET D.H., 1999. Intérêt d'une approche spatiale pour le suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Cas de la subdivision de Chistian dans le Punjab (Pakistan). Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 325 p.
- TYAGI N., 1996. Salinity management in irrigated agriculture. Sustainability of irrigated agriculture / Pereira, L.S. (éd.), P. 345-358.
- VAUCLIN M., 1994. Revue et état de l'art. Modélisation du transport de solutés dans la zone non saturée du sol. Revue des sciences de l'eau, 7 (1).