

17

Fabris

97.10.10



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE RURAL
LATE - PEDOLOGIE



Institut Français
de Recherche Scientifique
pour le Développement
en Coopération

90126

Travail pratique de diplôme

Février 1997

Etude du transport des sels au cours des écoulements et de l'évolution des propriétés physiques du sol au contact de différentes solutions salines



Lorenz MEYER, DIPLOMANT

Jean-Claude VEDY, EPFL

Pascal BOIVIN, ORSTOM

Claude HAMMECKER, ORSTOM

Philippe DE PURY, EPFL

Fonds Documentaire ORSTOM



010016456

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: AX-16456 Ex:

Remerciements

Je remercie cordialement tous ceux qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à la bonne réussite de ce travail et qui ont rendu possible ce séjour inoubliable au Sénégal.

Mes remerciements particuliers sont adressés à:

P. Boivin, directeur du laboratoire de pédologie de l'ORSTOM, responsable pour l'encadrement sur place;

C. Hammecker, chercheur à l'ORSTOM, pour son soutien scientifique;

Prof. J.-C. Védy, professeur à l'EPFL, responsable de ce travail de diplôme;

P. de Pury, qui entretient les relations de l'EPFL avec l'ORSTOM;

Les employés du laboratoire, M. Badiane, D. Faye et très particulièrement Balla Traoré, qui m'a accompagné pendant deux mois dans la brousse;

Tous mes amis Sénégalais que j'ai rencontrés pendant mon séjour, tout d'abord Abdoulaye Baldé; sa famille est devenue ma seconde famille;

Ma famille, pour tout l'amour que je reçois d'eux chaque jour et le soutien qu'elle m'a donné pour devenir ce que je suis et d'arriver ces jours à la fin de mes études;

et finalement IdM, Ingénieurs du Monde, pour leur soutien financier.

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: Ax 16456 Ex:

Table des Matières

1. Introduction	1
2. Objectifs du travail	3
3. Bases théoriques	3
Mécanismes de dégradation des sols et indicateurs chimiques	3
Evolution structurale du sol au contact de solutions salines	5
<i>La double-couche diffuse de Gouy-Chapman</i>	5
<i>Mécanismes physiques</i>	6
<i>Désagrégation</i>	7
Mesures expérimentales de l'interaction des solutions avec la conductivité hydraulique;	
Revue bibliographique	7
<i>Méthode de laboratoire</i>	7
<i>Comparaison des résultats</i>	7
<i>Critique de la méthode de mesure</i>	8
<i>Etablissement du protocole de mesures</i>	9
<i>Les concentrations utilisés</i>	9
Transport du sel	10
4. Méthodes et matériel	12
Protocole de mesure	12
L'infiltromètre à succion	12
Choix des sites	14
Mesures préliminaires	15
Evolution des propriétés physiques du sol	16
Transport du sel	17
Exploitation des données	19
Courbes d'infiltration	19
<i>Equations de base</i>	19
<i>Traitement des données</i>	22
Profils d'humidité et de salinité	23
5. Résultats	26
Dispersion des argiles	26
Résultats 'bruts'	26
Méthode de Wooding	27
Méthode du régime transitoire	29
<i>Analyse des erreurs</i>	29
<i>Améliorations possibles de la méthode pour déterminer S et B</i>	30
Comptage des fentes	32
Comparaison des deux méthodes de dépouillement	32
Changement de la conductivité en fonction de la concentration et du SAR	33
Interprétation des résultats	34
Transport du sel	34
Profils d'humidité et de conductivité électrique	34
Lessivage des sels avec l'eau percolée	35
Simulation	36
Discussion	37
Conclusions	38
Evolution physique des propriétés du sol	38
Transport et diffusion des sels	38

1. Introduction

Le cadre géographique de ce travail correspond aux environs de la ville de Podor, située sur le fleuve Sénégal (voir cartes en annexe). La région du fleuve, appelée Fouta (ou Fouta Toro, pour distinguer du Fouta Diallo en Guinée) est au Nord du pays sur la frontière avec la Mauritanie. Le Fouta est habité par les Haalpulaaren (= 'ceux qui parlent Peul'). Le peuple Peul est présent dans tous les pays du Sahel depuis le Sénégal à l'Ouest jusqu'au Cameroun et le Tchad à l'Est. Ce peuple est devenu sédentaire seulement récemment, l'élevage du bétail (vaches, moutons et chèvres) est son occupation traditionnelle. En Mauritanie, où le climat est plus sec et les ressources alimentaires sont plus pauvres, le nomadisme est toujours répandu.

L'agriculture traditionnelle connaît plusieurs formes de culture. Dans le jeeri (haut pays bordant la vallée, dont les terres ne sont jamais inondées par la crue), du mil est cultivé en culture pluviale pendant l'hivernage. Les rendements sont faibles et un resemis est souvent nécessaire à cause des pluies faibles et irrégulières. Dans le waalo (la vallée du fleuve), la culture de décrue (du sorgho, une céréale proche du mil) est pratiquée en saison sèche sur les surfaces inondées par le fleuve lors de l'hivernage, et dans les cuvettes, où l'eau de pluie stagne. L'importance des surfaces cultivées ainsi varie avec l'intensité des crues. A ces cultures s'ajoutent les cultures des berges (maïs, niébé et maraîchage).

Depuis les années soixante, un changement de climat se manifeste dans le Sahel. Les précipitations ont diminué, pour aboutir aux années de sécheresse de 1973 à 1975. Depuis, d'autres années de sécheresse ont suivi; les années passées ont bénéficié de précipitations un peu plus élevées, qui ont permis à l'herbe de repousser là, où elle avait disparu avant. Face à ces changements, l'irrigation est devenue nécessaire pour assurer l'alimentation de la population.

Un profond bouleversement des structures à tous les niveaux a été causé par la construction des barrages de Diama et de Manantali. Ce projet, dont les bailleurs de fonds principaux sont la France, l'Allemagne et la Banque Mondiale, a été promu par l'OMVS¹. Les objectifs affichés avant la construction sont premièrement la production d'électricité à Manantali au Mali, puis la possibilité de développer 350 000 ha de cultures irriguées sur la rive gauche, la navigation sur le fleuve jusqu'à Bakel et l'approvisionnement en eau potable des deux centres urbains de Dakar et de Nouakchott. Avant la construction du barrage de Diama (1986), l'eau de mer remontait le fleuve jusqu'à 200 km, en raison des faibles débits et la pente infime (La ville Podor se situe entre 5 et 7 m au dessus du niveau de mer). Actuellement, le barrage empêche les remontées d'eau de mer dans le fleuve pendant la saison sèche et rehausse le niveau du fleuve pour faciliter la prise d'eau pour l'irrigation. Le barrage de Manantali (1990) sert à la production d'électricité. Il lamine les crues, qui sont causées par les précipitations en Guinée. Depuis sa construction, les crues restent absentes ou très faibles, ainsi les cultures de décrue ont perdu toute leur importance.

Freinée par le conflit entre le Sénégal et la Mauritanie en 1989 et par d'autres facteurs, la construction des barrages n'a atteint aucun de ses buts. Jusqu'à présent, la centrale électrique de Manantali n'a pas été achevée. La navigation sur le fleuve ne va pas se faire pour manque d'intérêt économique. L'approvisionnement en eau potable ne s'est pas réalisée dans la mesure prévue; même si la qualité de l'eau potable puisée au lac de Guiers (environ 30% de la

¹ OMVS: Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal. Elle est présidée par les trois pays Sénégal, Mali et Mauritanie.

consommation de Dakar) s'est améliorée depuis que celui-ci est alimenté par le fleuve pendant toute l'année et non seulement pendant l'hivernage. L'irrigation n'a jamais vu le développement espéré; à présent à peine 60 000 ha sont irrigués, et ceux-ci seulement pour une récolte, au lieu des deux possibles par année. L'irrigation ne s'est pas plus développée, parce qu'il n'est pas rentable pour les paysans de produire du riz pour la vente. Les investissements sont trop lourds. La riziculture se fait principalement pour l'auto-consommation. A coté de cela, des oignons et des tomates sont cultivés et vendus pour payer les frais d'exploitation importants. Avant la construction des barrages, on espérait, que l'irrigation sur le fleuve Sénégal pourrait contribuer de façon importante à l'autosuffisance alimentaire du pays. Jusqu'à présent, elle n'a pas vu ce développement, elle assure seulement la nutrition de la population paysanne, et ne sera jamais capable de rembourser les investissements lourds qui ont été consentis.

L'irrigation est pratiquée à des échelles variées. Des périmètres importants à investissements lourds, comme celui de la SAED (société d'état) côtoient des périmètres villageois rudimentaires (groupe motopompe dans le fleuve, canaux creusés à la main). La mécanisation du labour est assez répandue, alors que la moisson se fait généralement à la main.

L'irrigation peut causer plusieurs effets négatifs pour le fonctionnement du sol. Le sol étant relativement peu perméable à cause de la teneur en argile élevée, des nappes perchées peuvent apparaître et devenir affleurantes. Ceci peut conduire à un égorgement des sols. Une autre conséquence est la remontée des sels marins présents dans le sous-sol de toute la région. Ceci conduit à une accumulation de sel dans les couches superficielles. La salinisation est souvent accompagnée d'une alcalinisation (hausse de pH) et une dégradation de la structure causée par le sodium. La salinité des périmètres villageois de la région de Nianga a atteint le seuil de tolérance pour les cultures, et des surfaces importantes ont été abandonnées à cause de la réduction de la fertilité, ceci après une durée d'irrigation de moins de dix ans.

Le programme de recherche mis en place par l'ORSTOM et l'ISRA² vise à définir la performance actuelle de l'irrigation et les problématiques sociales et environnementales mises en jeu, pour proposer une évolution favorable dans le futur vers une diversification et une meilleure rentabilité (Boivin et al., 1995A). La recherche se concentre sur la région de Podor, qui a été choisie pour représenter l'ensemble de la moyenne vallée. Pendant les premières années de recherche (1991-1994), un inventaire général à été fait dans tous les disciplines (démographie, géographie, sociologie, socio-économie, agronomie, hydrologie et pédologie). Une deuxième phase de recherche est orientée vers des propositions concrètes pour l'évolution des systèmes de culture.

Les études pédologiques menées par l'ORSTOM ont pour but de décrire le comportement du sol, les transferts hydriques et salins pour différentes pratiques de culture (Samba, 1997). La comparaison de ces résultats permettra d'identifier les formes d'irrigation à promouvoir et celles à éviter, pour protéger au mieux le sol et assurer une irrigation prolongée sans dégradation irréversible des sols. Pour l'instant les recherches ne sont pas encore avancées au point de pouvoir faire des recommandations d'ordre pratique.

Les problèmes de durabilité de l'exploitation du sol sont liés aux interactions entre l'eau, le sol et les sels. L'artificialisation du milieu a généré de nouvelles conditions pour l'évolution des sols. L'irrigation présente notamment un risque de dégradation physique du sol lié à

² ISRA: Institut Sénégalais de la Recherche Agricole

l'accumulation de sodium sur le complexe d'échange. Les concepts et mécanismes correspondants seront expliqués plus loin.

2. Objectifs du travail

Une des voies de recherche explorées au laboratoire de pédologie est la modélisation des transferts d'eau et des solutés dans le sol, pour essayer de prévoir leur évolution. C'est dans ce cadre que se situe mon travail. Il explore deux points essentiels de la modélisation:

- l'évolution des propriétés physiques du sol au contact de solutions salines
- l'étude de la diffusion et du transport des solutions salines au cours des écoulements

Ces deux points peuvent être abordés par un protocole similaire, c'est pourquoi ils sont traités simultanément. Le protocole retenu permet en même temps de fournir des résultats indispensables à la modélisation du transport d'eau et des solutés, tout en visant à faire progresser certaines connaissances fondamentales dans ce domaine.

3. Bases théoriques

Dans la suite sont présentés différents éléments de base théoriques des concepts que nous abordons. Ensuite, l'état des connaissances et les expérimentations faites dans ce domaine sont résumés dans une étude bibliographique. Ceci nous permet de préciser et de justifier notre protocole expérimental.

Mécanismes de dégradation des sols et indicateurs chimiques

Salinisation

Accumulation excessive de sels solubles (chlorures, sulfates, carbonates de sodium et de magnésium par exemple) dans le profil de sol. Dans la vallée du fleuve Sénégal ce sont les sels marins dans les sédiments déposés lors du recul de l'estuaire. Le sel dominant est le chlorure de sodium. L'irrigation remobilise ces sels, qui tendent à migrer vers la surface du sol par l'évaporation et la remontée de la nappe. La concentration élevée des sels diminue la disponibilité de l'eau pour la plante.

Sodisation

Accumulation du sodium sur le complexe d'échange. La sodisation se manifeste par une diminution de la porosité et de la stabilité structurale du sol. La structure du sol s'effondre, et la culture devient impossible. Le phénomène se produit lorsque un certain seuil de saturation du complexe d'échange en Na est atteint. Ce seuil se situe à 10% environ, mais il est très variable. Sur des sols sensibles, le seuil peut être atteint déjà à 5%, pendant que d'autres sols résistent à des taux de saturation en Na jusqu'à 50%.

Alcalinisation

Accumulation des bases faibles (HCO_3^-) qui conduit à une hausse du pH. Un pH trop élevé pose par lui-même des problèmes pour la croissance des plantes. Mais l'alcalinisation est

d'autant plus dangereuse qu'elle accélère le processus de la sodisation (définitions tirées de Samba, 1997).

ESP / ESR

L'ESP (Exchangeable Sodium Percentage), et l'ESR (Exchangeable Sodium Ratio) expriment le rapport entre le sodium échangeable et le calcium et magnésium échangeables (Curtin and Smillie, 1995):

$$ESR = \frac{[NaX]}{[CaX] + [MgX]} \quad (3.1)$$

$$ESP[\%] = 100 \cdot ESR \quad (3.2)$$

X: représente la surface du cristal chargée négativement

Une autre définition a été donnée par Bresler et al. (1982):

$$ESR = \frac{[NaX]}{CEC - [NaX]} \quad (3.3)$$

CEC: capacité d'échange cationique

Dans la majorité des cas, les deux définitions sont équivalentes, parce que la CEC est principalement occupée par ces trois cations, Na, Ca et Mg.

SAR

Le SAR (Sodium Absorption Ratio) est défini par la relation (et al., 1982):

$$SAR = \frac{[Na^+]}{([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])^{1/2}} \quad (3.4)$$

où toutes les concentrations sont en meq/l.

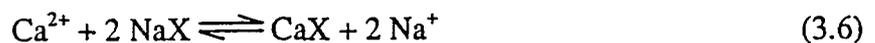
La relation entre le SAR et l'ESR est très simple, elle est donnée par l'équation de Gapon, une relation empirique (Curtin and Smillie, 1995):

$$ESR = k_g \cdot SAR \quad (3.5)$$

k_g : coefficient de sélectivité de Gapon

SAR: SAR de la solution du sol saturé.

Cette relation peut être expliquée par la réaction d'équilibre entre les espèces adsorbées sur le complexe d'échange et les ions dans la solution (La réaction d'échange des ions n'est pas une réaction d'équilibre thermodynamique dans un sens strict, parce qu'elle n'est pas entièrement réversible), et la constante d'équilibre correspondante (Rieu et Cheverry, 1976):



$$K = \frac{[Na^+]^2 \cdot N_{Ca}}{[Ca^{2+}] \cdot N_{Na}^2} \quad (3.7)$$

N: fractions ioniques des cations adsorbées

L'interaction entre Ca et Mg influence la valeur de k_g . En général, les sols ont une préférence pour le Ca, une augmentation de la proportion de Mg aboutit à un ESR plus élevé.

Appréciation du risque inhérent à l'eau d'irrigation

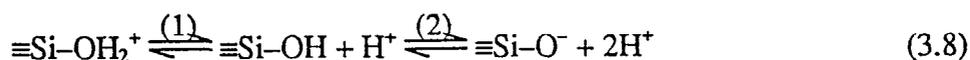
Le danger que représente l'eau a été souvent apprécié à l'aide du SAR. Les eaux du fleuve Sénégal ont un SAR bas, et elles ont été considérées pendant longtemps comme étant de bonne qualité. Cependant, l'appréciation de la qualité de l'eau basée sur le SAR pose des problèmes pour la prédiction des risques effectifs, parce que le SAR change avec le facteur de concentration de l'eau. D'une part, le SAR augmente si l'eau est concentrée par évaporation, à cause de la non-linéarité du SAR. D'autre part la précipitation de minéraux (CaCO_3 , CaSO_4 et Na_2SO_4) pendant l'évaporation de l'eau affecte sensiblement la composition de la solution du sol. L'approche de l'école française classe les eaux selon leur évolution lors d'une concentration progressive (Vallès et al., 1991; Droubi, 1980). On distingue notamment la voie alcaline et la voie saline neutre à l'aide de l'alcalinité résiduelle. En voie alcaline (alcalinité résiduelle positive), le pH augmente et le calcium dans la solution du sol précipite progressivement sous forme de calcite, et en raison de cela, le sodium devient dominant dans la solution et s'accumule sur le complexe d'échange. La sodisation conduit à une dégradation physique (structure) et chimique (complexe d'échange, pH) du sol, qui est plus ou moins irréversible. En voie saline neutre (alcalinité résiduelle négative), la pression osmotique augmente à cause de la concentration des sels, ce qui peut entraîner des effets de toxicité pour les plantes. Le risque que le sodium domine le complexe d'échange est beaucoup plus petit. La dégradation par voie saline neutre est réversible (lessivage des sels).

Dans la vallée du fleuve Sénégal, il est difficile de prédire dans quelle voie le sol va évoluer. Les eaux d'irrigation ont une alcalinité résiduelle légèrement positive (voie alcaline), calculée avec le calcium seulement. Si on tient compte aussi du magnésium, l'alcalinité résiduelle devient légèrement négative (voie saline neutre). Dans la vallée amont, c'est plutôt l'alcalinisation qui domine, pendant que dans la région de Podor c'est plutôt la voie saline. Cette tendance peut changer dans le futur, parce que le régime hydrique et salin du fleuve a été modifié par les barrages.

Evolution structurale du sol au contact de solutions salines

La double-couche diffuse de Gouy-Chapman

Les charges de surface sur les argiles ont deux natures différentes. On distingue les charges permanentes des charges variables. Les charges permanentes sont dues aux substitutions isomorphiques dans la structure cristalline de l'argile (par exemple des atomes de Si remplacés par Al). Elles ne changent pas selon les propriétés de la solution, alors que les charges variables sont conditionnées par le pH. Celles-ci résultent des réactions acide-base à la surface des argiles:



Sur les faces des feuillets d'argiles, la charge est négative pour les valeurs de pH usuels (la réaction (1) n'a lieu qu'à des pH très bas). Sur les bordes des feuillets, il y a en même temps des charges positives et négatives. La charge augmente avec le pH, et avec elle augmentent les forces répulsives entre les feuillets. Ainsi un pH élevé favorise la dispersion (alcalinisation).

La double-couche diffuse est composée de la charge sur l'argile, et des ions de charge opposée à la surface, qui neutralisent la charge de la surface. La distribution des ions dans la couche extérieure suit une loi exponentielle, elle est contrôlée par l'attraction des ions par la surface d'une part, et d'autre part par la diffusion qui les éloigne. L'épaisseur de la couche diffuse est inversement proportionnelle au carré de la charge de l'ion et à la concentration de la solution du sol (Sumner, 1993). Cela veut dire que les ions divalents (Ca,

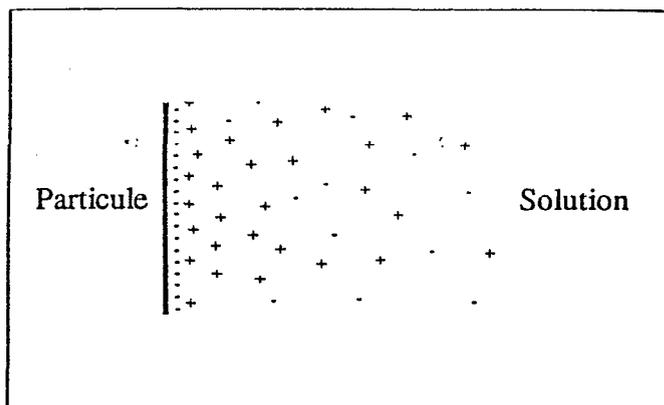


Fig. 1: Distribution schématique des charges dans la double-couche diffuse selon la théorie de Gouy-Chapman (van Olphen dans Sumner, 1993)

Mg) sont attirés beaucoup plus fortement (couche plus mince) que les ions monovalents (Na, K). Les forces répulsives augmentent avec l'épaisseur de la couche diffuse, pendant que les forces attractives (interaction de Van der Waals) diminuent avec le carré de la distance. Ainsi les particules sont floculés seulement si la couche diffuse est assez mince pour que les forces de Van der Waals dominent sur les forces de Coulomb. La concentration d'électrolyte, en dessous de laquelle les forces répulsives dominent, est appelée concentration de floculation critique (CFC). Elle est fortement dépendante de la nature des ions, le sodium (et dans une mesure plus faible, le K et le Mg) ont un effet dispersant, alors que Ca est un floculant.

Mécanismes physiques

Le gonflement et la dispersion sont étroitement liés, ils résultent les deux de l'équilibre entre les forces attractives et répulsives dans la double-couche diffuse. Quand les argiles perdent leur cohésion, on parle de dispersion. Les particules d'argile se déplacent alors librement avec la solution du sol. Les argiles ainsi mobilisées bouchent les micropores du sol et réduisent fortement la conductivité hydraulique (CH). On peut distinguer la dispersion spontanée, quand les forces sont répulsives seulement, de la dispersion induite par de l'énergie mécanique. Celle-ci se produit, lorsque les forces sont attractives, si les feuillets sont proches, et deviennent répulsives, une fois que les particules sont séparées.

Lors du gonflement, de l'eau entre dans l'espace interfoliaire pour hydrater les cations entre les feuillets. Lorsque les cations sont du Ca^{2+} , le gonflement est très faible. Si par contre du sodium est présent dans l'espace interfoliaire, le gonflement est fortement augmenté, comme la théorie de la couche diffuse le prévoit. Le gonflement a un comportement de seuil. Aux faibles concentrations de Na, celui-ci se trouve seulement à la périphérie des cristallites (assemblage de plusieurs feuillets), une fois qu'un certain seuil est atteint, il va remplacer aussi le Ca interfoliaire. Le gonflement réduit la conductivité hydraulique; la porosité du sol diminue au dépend du volume des argiles.

Un autre effet de la dispersion est la formation d'une croûte de surface sous l'effet de la pluie. La formation de croûte a souvent un effet plus important sur la limitation de l'infiltration que la chute de la conductivité hydraulique dans le profil du sol. Dans les terres cultivées par contre, où la formation de croûte est empêchée par la culture, la dispersion est importante d'avantage sur toute la profondeur de labour, car les agrégats sont cassés par le travail mécanique. La diminution de l'infiltration a des effets secondaires importants. Non seulement il

y a moins d'eau disponible pour la végétation, mais l'érosion, avec tous les dégâts qu'elle peut causer, est accrue.

Désagrégation

En dehors de la dispersion et le gonflement, un troisième mécanisme est responsable de la diminution de la conductivité hydraulique: l'effondrement progressif des agrégats (le *slaking*, Abu-Sharar et al, 1987). Celui-ci se manifeste avant la dispersion, à des concentrations au dessus de la concentration critique de floculation, les forces qui relient les agrégats étant moins fortes que celles qui sont responsables de la floculation. La désagrégation mène à une diminution des macropores et à une compaction du sol. Puisque le liquide se déplace principalement dans les macropores, ceci induit une chute importante de la conductivité hydraulique.

Mesures expérimentales de l'interaction des solutions avec la CH; Revue bibliographique

Méthode de laboratoire

A quelques détails près, tous les auteurs consultés (Crescimanno et al., 1995; Curtin et al., 1994A; 1994B; 1994C; Amézketa et al., 1995; Abu-Sharar et al., 1987; 1995) ont utilisé la même méthode. Le sol séché est broyé et tamisé à 2 mm. Ensuite, il est mis dans des cylindres à la densité mesurée sur le terrain. Si le sol est trop fin, il est mélangé à du sable, pour maintenir la conductivité hydraulique à un niveau assez élevé. Des membranes sont placées en dessous et en dessus de l'échantillon. Les solutions utilisées ont des SAR différents (SAR = 0 à 40, selon auteur), avec à chaque SAR, une certaine gamme de concentrations (concentration maximale de 100 à 800 mmol/l). D'abord, les cylindres sont mouillés avec les solutions de la concentration la plus élevée. Toutes les solutions avec le même SAR sont percolées consécutivement à travers le même échantillon, en commençant avec la solution la plus concentrée et en diminuant la concentration ensuite. Les conductivités hydrauliques sont déterminées après avoir atteint le régime permanent (moment déterminé avec plusieurs méthodes différentes), pour toutes les solutions.

Comparaison des résultats

Deux tendances sont claires dans tous les résultats. Premièrement, la conductivité hydraulique diminue pour les concentrations faibles, et deuxièmement, elle diminue, lorsque le SAR augmente. Les deux tendances sont en correspondance avec la théorie expliquée plus haut. Souvent, la CH montre un comportement de seuil, Crescimanno et al. (1995) par contre observent une diminution linéaire; tant par rapport à la concentration que par rapport au SAR. Dans la figure 2 sont représentés les résultats obtenus par Curtin et al. (1994C), qui présentent un comportement de seuil assez prononcé, surtout pour les valeurs de SAR élevées.

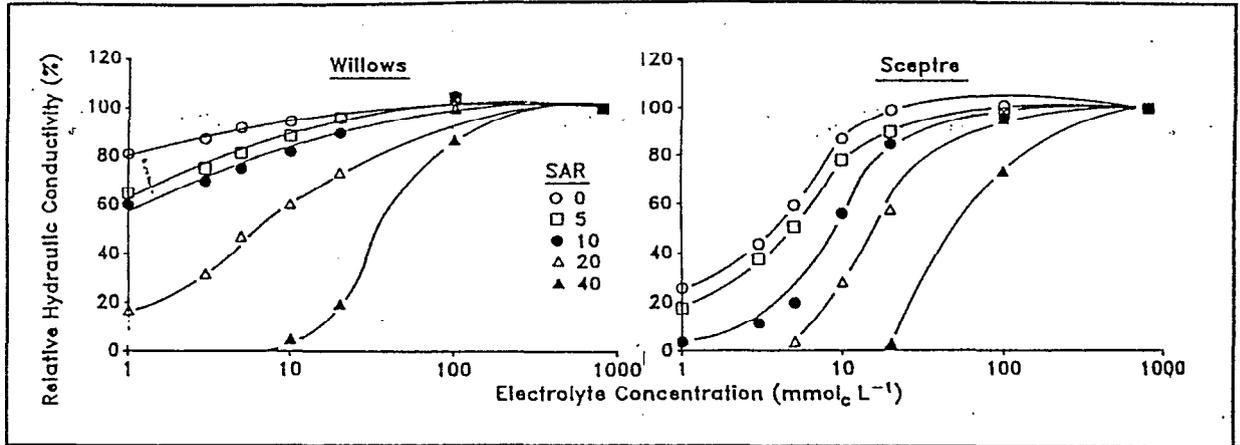


Fig. 2: Relation entre conductivité hydraulique, SAR et concentration (Curtin et al., 1994C)

Un désaccord existe entre les chercheurs en ce qui concerne l'importance relative entre les mécanismes responsables pour la diminution de la conductivité hydraulique. La TC (threshold concentration), concentration à partir de laquelle une diminution de 25% de la conductivité est observée, est plus haute que la concentration de floculation (CFC) pour les argiles présentes dans le sol (Amézketa et al., 1995). Curtin et al. (1994A) montre que la fraction limoneuse est dispersée avant les argiles, et que la dispersion est déjà importante à des concentrations beaucoup plus élevées que la CFC, indiquant que ce phénomène domine sur la dispersion des argiles. Abu-Sharar et al. (1995) par contre trouve une correspondance entre le seuil de dispersion et la chute de la conductivité, et une diminution progressive de la CH en dessus de ce seuil est due à l'effondrement des agrégats (slaking). Un autre phénomène est proposé par Amézketa et al. (1995), l'« explosion osmotique ». Elle est causée par un gradient de concentration entre la solution de sol concentrée à l'intérieur de l'agrégat et la solution diluée percolée. L'eau entre à l'intérieur de l'agrégat et le fait « exploser » par la pression osmotique. Ce phénomène est induit par la méthode de laboratoire, qui fait percoler les solutions avec des diminutions abruptes de la concentration. Le travail de Crescimanno et al. (1995) est le seul qui s'est fait avec des sols gonflants. Le comportement du gonflement (mesuré sur des échantillons non-remaniés) a été influencé seulement légèrement par l'ESP du sol (ESP = 2 et 10, valeurs faibles), le gonflement a eu alors seulement un effet secondaire sur la diminution de la conductivité hydraulique.

Critique de la méthode de mesure

La méthode de mesure de la conductivité hydraulique comme elle est pratiquée, pose plusieurs problèmes.

- La préparation du sol (broyage, tamisage) change profondément la structure du sol. La valeur de la conductivité mesurée n'a rien à voir avec la conductivité du sol in situ. En plus, les agrégats sont brisés, et ainsi la dispersion des argiles et des limons est augmentée. Ceci peut changer le comportement de la CH.
- L'utilisation du même échantillon pour mesurer l'effet de plusieurs solutions avec des concentrations différentes, génère plusieurs erreurs systématiques sur les résultats.
 - Les mesures ne sont pas indépendantes. Chaque solution va modifier les propriétés du sol et changer ainsi les conditions pour la mesure suivante. La diminution de la CH causée par les solutions précédentes s'ajoutent à l'effet de la dernière mesure. Les chutes de la CH mesurées sont donc probablement surestimées par rapport aux conductivités lors des essais indépendants.

surestimées
par rapport

- La diminution de la perméabilité est probablement renforcée par les forts gradients de concentration entre les macropores et les micropores à l'intérieur des agrégats causés par le changement abrupt de concentration.

- Les solutions avec le même SAR n'ont pas du tout la même composition. La série des solutions n'est pas du tout obtenue par une dilution (voir tableau 2). Ceci est une autre raison pour mettre la percolation successive des solutions en question.

• Les séries de mesures ainsi obtenues peuvent donner quelques résultats intéressants pour comprendre les mécanismes impliqués, mais ils ne sont pas représentatifs des conditions de terrain. Et pourtant pour pouvoir faire des modélisations sur le comportement des sols et les transferts de sel, il faut estimer les conductivités réelles et l'importance de ses changements suite aux changements chimiques.

Etablissement du protocole de mesures

Nous avons développé un protocole de mesure qui évite tous ces problèmes autant que possible. Des infiltrations ont été faites *in situ* avec un nombre de solutions de SAR et de concentrations différents. Comme appareil de mesure a été choisi l'infiltromètre à succion, qui est couramment utilisé pour la mesure de la conductivité hydraulique sur le terrain. Le grand avantage par rapport aux mesures d'infiltration en charge (infiltration à double anneau par exemple) est que les écoulements préférentiels dans la macroporosité sont éliminés. Les deux méthodes de mesures choisies sont l'infiltration à deux succions différentes, et la méthode du régime transitoire.

Les changements physiques du sol ne sont pas instantanés au contact avec les solutions. Pour permettre une réaction aussi complète que possible, il faut que le sol ait un contact prolongé avec la solution. Si la solution sera infiltrée directement avec l'infiltromètre, cette réaction tardera. Il faut que le sol soit imbibé avec la solution avant que la mesure commence. Ainsi, 3 l de chaque solution ont été infiltrés sous faible charge à l'aide d'un anneau d'un diamètre de 24 cm. Après avoir laissé sécher pendant plusieurs jours, une mesure à l'infiltromètre a été prise au même endroit avec la solution correspondante.

Les concentrations utilisées

Le choix des solutions utilisées a été fait suite à l'étude bibliographique. 18 solutions de sel avec des SAR de 0 à 80 et des concentrations de 0 (eau distillée) à 100 meq/l ont été utilisées. La figure 3 montre l'emplacement des seuils observés dans l'espace SAR - concentration, et le domaine qui a été couvert par les solutions choisies. Dans le graphique, les seuils sont dessinés comme points, même si la chute de la conductivité hydraulique est progressive. Malheureusement, les unités ne sont pas toujours les mêmes, meq/l est utilisé en même temps que mmol/l. Il n'y a pas de relation simple

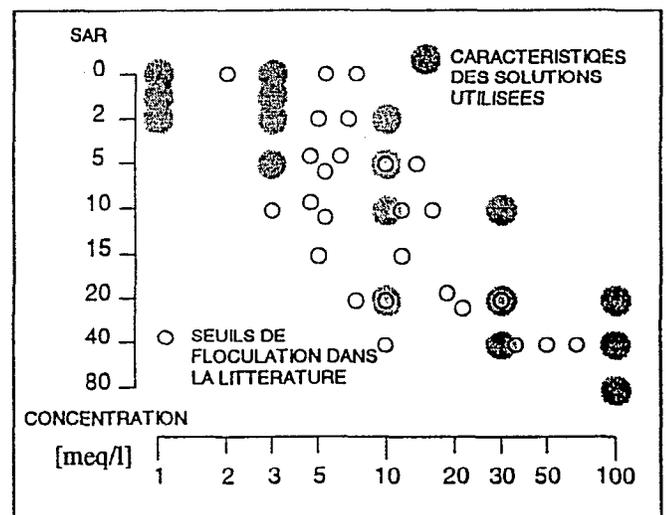


Fig. 3: SAR et concentrations où des seuils ont été observés, solutions utilisées dans ce travail

entre les deux, puisque les solutions sont des mélanges de Na^+ (1 mmol/l = 1 meq/l, SAR élevés) et de Ca^{2+} (1 mmol/l = 2 meq/l, SAR faibles). Pour simplifier, les deux unités ne sont pas distinguées dans le graphique.

Transport du sel

Le transport du sel dans le sol a lieu dans la phase liquide. Les ions se déplacent par diffusion moléculaire d'une part, et avec le flux de la solution du sol d'autre part. Quand il y a un flux, la diffusion convective s'ajoute à la diffusion moléculaire. Le transport de sel est modélisé de la façon suivante (Clothier et al., 1992):

La solution de sol est partagée en deux phases, la phase immobile (l'eau dans la microporosité et les pores occluses) et la phase mobile (porosité efficace, macropores), où le transport des solutés a lieu. Pour la phase mobile l'équation de diffusion s'écrit comme suit:

$$\theta_m \frac{\partial c_m}{\partial t} = \theta_m D \frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2} - q \frac{\partial c_m}{\partial z} - \theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} \quad (3.9)$$

où t est le temps et z la profondeur dans le sol.

q : vitesse d'approche

θ_m, θ_{im} : fraction mobile et immobile, rapportées au volume total du sol, $\theta_m + \theta_{im} = \theta$

c_m, c_{im} : concentration du soluté dans la fraction mobile et immobile

D : coefficient de diffusion dans le sens de l'écoulement, tenant compte en même temps de la diffusion convective et de la diffusion moléculaire. Par hypothèse il n'y a pas de diffusion moléculaire dans le sens de l'écoulement dans la fraction immobile.

$\theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t}$: terme qui tient compte de la diffusion moléculaire vers la fraction immobile,

peut être exprimé par:
$$\theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \alpha (c_m - c_{im}) \quad (3.10)$$

α : paramètre qui décrit la diffusion, a l'unité de $[\text{s}^{-1}]$

θ_m et θ_{im} sont mesurées avec la méthode utilisée par Clothier et al. (1992) et Angulo et al. (1995). Avec un infiltromètre à succion, de l'eau sans traceur est infiltrée, suivie d'une solution avec traceur. Puis, la concentration c^* du traceur à la surface du sol est déterminée. Le traceur se répartit entre la phase mobile et la phase immobile:

$$\theta c^* = \theta_m c_m + \theta_{im} c_{im} \quad (3.11)$$

Si (1) la diffusion entre les deux phases est négligeable et (2) le traceur n'était pas présent dans le sol à l'avance, alors c_m est égale à la concentration de la solution infiltrée, et $c_{im} = 0$, et l'équation se simplifie à:

$$\theta_m = \theta \frac{c^*}{c_m} \quad (3.12)$$

Les deux hypothèses ne sont pas pleinement justifiées dans notre cas, le calcul a été alors adapté comme suit.

- $c_{im} \neq 0$, le sol présente une certaine teneur en sel initiale. Dans le traitement des données on a tenu compte de cela, la concentration c_{im} est connue grâce à un témoin sans sel.
- La diffusion entre les deux phases n'est plus négligeable pour un temps d'infiltration long. Pour le traitement des données, elle est supposée négligeable pour les infiltrations courtes durées (~50 min), et il en a été tenu compte pour l'infiltration longue durée (2 h 20 min).

Les paramètres D , θ_m et θ_{im} dépendent tous de la succion à laquelle l'eau a été infiltrée. En effet, plus le potentiel est grand, plus la teneur en eau est petite. Par ailleurs, la taille moyenne des pores fonctionnels (λ_m) diminue elle-aussi avec la teneur en eau. La fraction mobile peut être mise en relation avec λ_m (Angulo et al., 1995), mais la relation est plus complexe et en dehors du sujet de ce travail. Pour étudier la variation de ces paramètres avec le potentiel, l'expérience a été faite à trois potentiels différents.

Pour obtenir des profils de salinité dans le sol, auxquelles ces équations peuvent être appliquées, de l'eau et des solutions salines ont été infiltrées avec l'infiltromètre à succion. Cinq infiltrations ont été faites, avec des proportions eau - sel et des succions différentes. Après l'infiltration, des échantillons de sol ont été prélevés pour déterminer le profil de la teneur en eau et de la salinité, qui a été estimée par la conductivité électrique.

4. Méthodes et matériel

Protocole de mesure

Il n'a pas été possible de mettre au point un protocole de mesure qui permette d'exploiter les mêmes infiltrations pour déterminer les paramètres décrivant le transport du sel et les variations de la conductivité hydraulique en appliquant des solutions différentes. Ainsi les deux études ont demandé deux protocoles de mesure distincts. Les sites d'expérience et l'appareillage (l'infiltromètre à suction) sont cependant les mêmes.

L'infiltromètre à suction

Un infiltromètre a trois parties principales: le disque mis en contact avec le sol, le réservoir d'eau, et un système de contrôle de pression.

L'eau à l'intérieur de l'infiltromètre est en dépression et entre en contact avec le sol à travers une membrane fixée sur un disque. Le flux est entretenu par la suction du sol. Une couche de sable est appliquée à la surface du sol pour garantir un bon contact sur toute la surface de la membrane. La suction à la membrane (h) est contrôlée par la profondeur à laquelle le tube d'entrée d'air est enfoncé dans la vase de Mariotte (h_1). Il faut soustraire de cette valeur la pression hydrostatique entre la sortie du tube de communication et la membrane (h_2).

$$h = h_1 - h_2 \quad (4.1)$$

Pour les expériences, deux infiltromètres différents ont été utilisés, un dont le disque est solidaire avec les deux autres parties (infiltromètre à membrane fixe, dans la suite appelé IMF), et un dont le disque n'est relié au réservoir qu'avec un tuyau (infiltromètre à membrane déportée, IMD). Un troisième infiltromètre à membrane fixe (IMF2) avec un rayon de disque inférieur a été utilisé pour des mesures préliminaires, mais abandonné après. La figure montre seulement l'IMD, l'IMF ne diffère que par la disposition spatiale des éléments, le système est identique pour les deux appareils (Pour une description détaillée de IMF et IMF2, se référer à Degoumois, 1995).

Les deux infiltromètres IMD et IMF n'ont pas exactement le même rayon de disque. Pour pouvoir comparer les deux mesures, le diamètre de la couche de sable était le même pour les deux infiltromètres. La surface de sable en contact avec le sol est déterminante. Elle était contrôlée pendant la préparation du sol. Le sable a été nivelé à l'aide d'un disque de bois, qui a

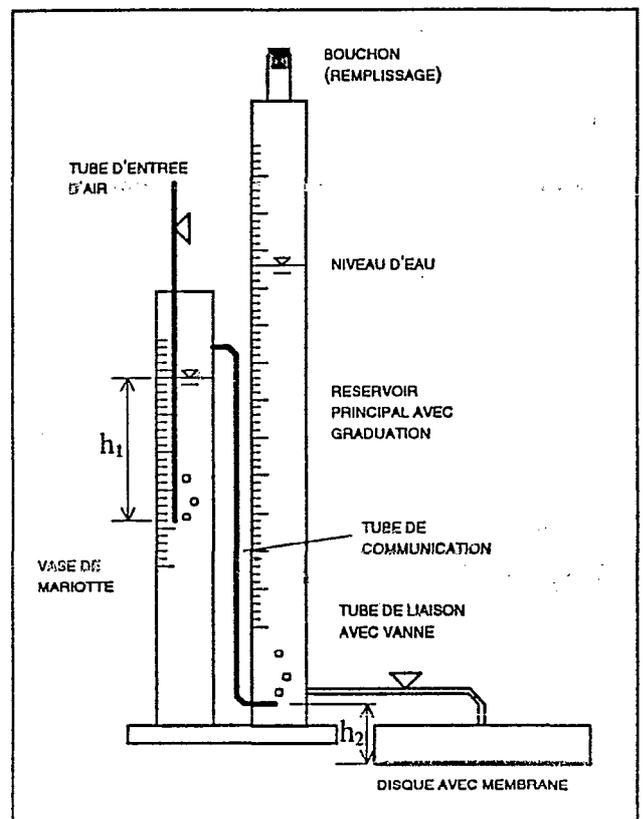


Figure 4: Infiltromètre à membrane déportée

été posé sur la galette de sable et tout sable dépassant les bords a été enlevé à l'aide d'un pinceau.

Lors de la mise en place de l'IMD, il faut placer l'embase du réservoir et le disque à la même hauteur à l'aide d'un niveau, pour contrôler la succion appliquée.

Au début de la mesure, la hauteur d'eau dans le réservoir est notée, ainsi que le temps d'ouverture de l'entrée d'air. En intervalles d'une à dix minutes, selon la vitesse d'infiltration, la hauteur d'eau et le temps sont enregistrés. Ceci donnera la courbe d'infiltration.

Les dimensions des infiltromètres sont résumées dans le tableau 3.

h_2 : voir figure 8

r : diamètre intérieur du réservoir

R_d : diamètre du disque

R : diamètre de la galette de sable

F : facteur de conversion

	IMD	IMF	IMF2
h_2 [cm]	5.5	1.0	4.5
r [cm]	2.275	1.70	1.70
R_d [cm]	11.3	12.5	4.2
R [cm]	11.3	11.3	4.2
F	24.67	44.18	6.10

Tableau 1: Dimensions caractéristiques des infiltromètres

Le facteur F sert à convertir la hauteur d'infiltration lue (I_{lue}) en lame d'eau infiltrée nette (I). F est le rapport entre la surface du sable et la section du réservoir.

$$F = R^2 / r^2 \quad (4.2)$$

$$I = I_{lue} / F \quad (4.3)$$

Choix des sites

En considérant le temps à disposition, seulement deux types de sol ont pu être étudiés. Les deux sites choisis sont situés dans les périmètres irrigués des villages de Ouro Madiou et Ngaoulé.

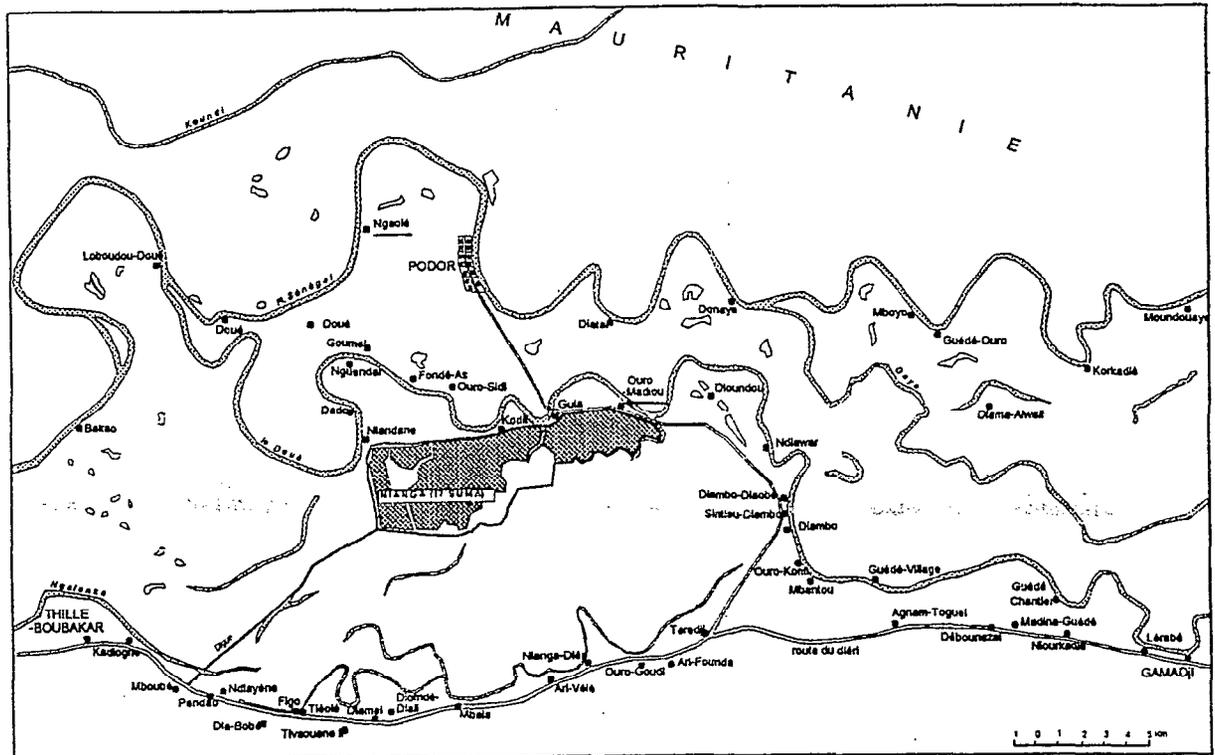


Fig. 5: Carte de la région de Podor (ORSTOM, 1995)

Le choix a été guidé par les réflexions suivantes:

- Sur les deux sites, différentes études antérieures ont été menées par l'ORSTOM. Notamment, A. De Luca (1996) a entrepris des mesures à l'infiltromètre à succion sur le site de Ouro Madiou. Ceci a permis d'apprécier à l'avance les conditions de travail et le temps nécessaire pour laisser percoler une quantité suffisante d'eau.

- La nature de l'étude (dispersion des argiles) implique que le sol doit être argileux. Sur les deux sites, le sol est argileux, mais les types de sol sont différents.

Le site à Ngaoulé représente les sols très argileux de la région, dont la teneur en argile se situe autour des 60% (Boivin et al., 1995B). C'est un sol argileux à caractères vertiques avec des fentes de retrait, qui peuvent atteindre trois centimètres de largeur, et des faces de glissement en profondeur. Sur le périmètre cultivé, le sol est bien structuré avec des agrégats polyédriques anguleux cohérents et stables à l'humectation. Des traces d'hydromorphie sont présentes jusqu'à la surface (teinte orange le long des racines sur fond brun - gris). Dans les surfaces adjacentes non cultivées, le sol porte par endroit une croûte épaisse, nettement stratifiée et appauvrie en argiles. Ceci démontre que le sol, malgré sa structure nette est sensible à la dégradation de la structure par dispersion des argiles.

A Ouro Madiou, le sol est moins argileux. Le taux d'argile varie de 10 à 25% (De Luca 1996). L'expérience a été faite dans la partie avec la plus forte teneur en argile. La texture est argileuse - sableuse. Le sol présente une structure subanguleuse. La porosité est importante, mais elle n'est pas fonctionnelle, car alvéolaire. Par endroit le sol ressemble à de la mousse.

L'air capté dans ces bulles diminue l'infiltration lors des pluies. Cette structure particulière est témoin de la faiblesse structurale due à la dispersion des argiles.

Ces deux types de sol représentent une partie importante des sols cultivés dans la région.

- Les critères du choix du site à petite échelle diffèrent pour les deux expériences.

Pour les mesures des conductivités hydrauliques, il a fallu une surface homogène de 5 m² environ. Le site choisi se situe à proximité du chenal d'irrigation à Ouro Madiou, et au bord du champs à Ngaoulé, endroits, où il n'y a pas de billonnage.

La culture des champs se fait par irrigation gravitaire. Un billonnage est préparé, les cultures (principalement oignons et tomates, le riz nécessite pas de billonnage) sont plantées sur les billons, pendant que les interbillons

sont submergés. Pendant l'irrigation, le sel migre vers les sommets des billons, où l'eau s'évapore. Après avoir fait des profils de salinité entre et sur les billons et à proximité du chenal d'irrigation, les interbillons ont été choisis pour les mesures du transport de sel. Les sommets des billons présentent une concentration de sel trop élevée et trop variable et l'emplacement proche du chenal n'est pas représentatif pour l'ensemble des champs.

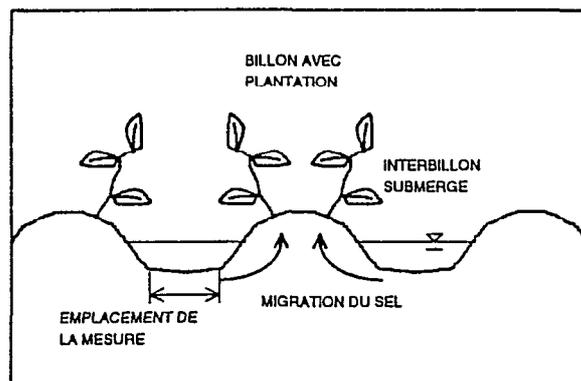


Figure 6: Prise des échantillons

Mesures préliminaires

Infiltration à trois succions différentes

Une infiltration préliminaire a été faite pour estimer le temps nécessaire pour faire une infiltration complète, et estimer le temps pour atteindre le régime permanent. Trois succions différentes ont été utilisées successivement (14 cm, 8 cm et 2 cm) pour déterminer lesquelles il faut utiliser dans la suite (14-2 ou 8-2). La croûte superficielle (quelques millimètres) a été enlevée pour éliminer ses effets. Si une croûte est présente, l'infiltration est déterminée par celle-ci et non par la conductivité hydraulique de l'horizon sous-jacent que nous étudions. Une croûte complique ou rend même impossible l'exploitation des résultats.

Après cette mesure, les pressions utilisées ont été fixées à 8 cm et 2 cm, parce que l'infiltration à 14 cm était jugée trop lente. Plus tard, les pressions ont été changées à 14 cm et 2 cm, parce que les vitesses finales d'infiltration à 8 cm et à 2 cm étaient trop proches pour permettre un calcul valable (voir le chapitre 'résultats - méthode de Wooding').

Infiltration double disque/double rayon

Trois anneaux ont été posés, et trois litres d'eau, correspondant à une lame de 66 mm, ont été infiltrés. Après 24 h, deux mesures d'infiltration ont été effectuées avec deux infiltromètres différents (des disques de rayons R_{grand} : 12.5 cm et R_{petit} : 4.2 cm) et à deux succions différentes. Ces mesures auront dû permettre de comparer les différentes méthodes de calcul du K_s , mais on a constaté, qu'il faut attendre que le sol soit totalement sec, avant de commencer les mesures. On a aussi vu que les résultats des deux infiltromètres sont trop différents, et qu'il ne sera pas possible d'utiliser les deux et de comparer les résultats les uns avec les autres. Pour cette raison, on n'a plus utilisé le petit infiltromètre dans la suite.

Après les infiltrations, des échantillons de sol de volume connu ont été prélevés sous l'infiltromètre (teneur en eau à saturation θ_{sat} , la teneur en eau à une succion de 2 cm peut être assimilée à θ_{sat}), dans le troisième anneau (teneur en eau avant l'infiltration θ_{ini}) et sur sol sec (θ_{sec}). En même temps, la densité apparente sèche a été déterminée.

Evolution des propriétés physiques du sol

Les solutions

Le choix des solutions est expliqué dans le chapitre 'Bases théoriques'. Pour préparer les solutions, on a utilisé du chlorure de sodium et du plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) pour ajuster le SAR. Le plâtre a l'avantage sur le CaCl_2 , d'être disponible partout, mais il est peu soluble à l'eau. Sa solubilité est cependant suffisante pour cette application, la concentration utilisée la plus forte étant de 1.24 g/l. Le tableau suivant donne les concentrations des solutions utilisées. 1 meq/l correspond à 55.5 mg NaCl/l et 72.1 mg CaSO_4 /l. Pour toutes les solutions de l'eau distillée a été utilisée. L'eau potable n'est pas utilisable, parce qu'elle est traitée au sulfate d'alumine, un flocculant puissant, qui risquerait d'empêcher la dispersion des argiles.

Conc. totale SAR meq/l		Na+ meq/l	Ca++ meq/l	NaCl g/l	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ g/l
0	-	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0.0721
1	1	0.618	0.382	0.0343	0.0275
1	2	0.828	0.172	0.0460	0.0124
3	0	0	3	0	0.216
3	1	1.30	1.70	0.0723	0.122
3	2	2	1	0.111	0.0721
3	5	2.71	0.29	0.150	0.0211
10	2	4.63	5.37	0.257	0.387
10	5	7.66	2.34	0.425	0.169
10	10	9.16	0.84	0.508	0.0605
10	20	9.76	0.24	0.542	0.0172
30	10	24.2	5.8	1.34	0.421
30	20	28.0	2.0	1.56	0.142
30	40	29.5	0.5	1.63	0.0391
100	20	82.8	17.2	4.60	1.24
100	40	94.4	5.6	5.24	0.402
100	80	98.5	1.5	5.47	0.109

Tableau 2: Caractéristiques des solutions infiltrées

Le site a été choisi tel que la variation spatiale des propriétés du sol soit aussi petite que possible. Comme précaution supplémentaire, les solutions ont été infiltrées dans un ordre aléatoire, pour éviter qu'une variation spatiale éventuelle puisse se confondre avec l'effet dû aux solutions. Les anneaux ont été placés proches pour diminuer la variation spatiale, mais assez espacés pour que les bulbes d'humectation ne se touchent pas (>20 cm).

Les manipulations

La surface du sol a été décapée pour éviter l'effet de la croûte, de manière que la surface soit lisse et à niveau, pour diminuer l'épaisseur de la couche de sable. Les anneaux ont été enfoncés environ d'un centimètre pour éviter des fuites d'eau latérales. La quantité d'eau a été fixée à 3 l. Il a fallu limiter la quantité d'eau distillée nécessaire au minimum, malgré cela plus de 200 l ont été consommés. 3 l sont suffisants pour admettre que tout le sol humecté lors de la mesure à l'infiltromètre (2 l d'eau au maximum) a été mouillé à l'avance. La charge appliquée ne dépassait pas 4 cm.

Le sol a séché pendant au moins trois jours à Ouro Madiou, et six jours à Niaoulé, où le sol est plus argileux. Il est important que le sol soit sec sur toute la profondeur et non seulement à la surface, pour que l'homogénéité du sol en terme d'humidité soit assurée. Un anneau supplémentaire a été placé, pour vérifier l'humidité résiduelle après l'attente. Le sol avait séché suffisamment; il avait l'aspect sec, pourtant il était légèrement plus frais que le sol à coté qui n'avait pas été mouillé. Un gradient d'humidité peut entraîner un biais des mesures. Touma et Boivin (1988) ont fait une simulation sur un profil avec un gradient d'humidité fort, le sol était saturé en profondeur et sec en surface. Dans de telles conditions, l'erreur engendrée était de l'ordre de 20% sur la valeur de K_s . Dans notre cas, l'erreur due à l'humidité résiduelle doit être largement inférieure, et elle est alors négligeable.

Pendant le séchage, des fentes se sont développées sur la surface d'infiltration. Il y avait une différence nette entre les solutions, pour la saisir, un comptage des fentes a été fait. Une règle a été posée sur le sol, et toutes les fentes, qui ont coupé l'arête de la règle, ont été comptées. 12 longueurs (resp. 8 à Ngaoulé), chacune de 17 cm, 6 et 6 (4 et 4) perpendiculaires, ont été comptées ainsi (procédé utilisé par Favre (1995), simplifié). Avant de poser l'infiltromètre, une couche de sable a été appliquée. Elle était relativement épaisse (1 à 1.5 cm), pour compenser les rugosités.

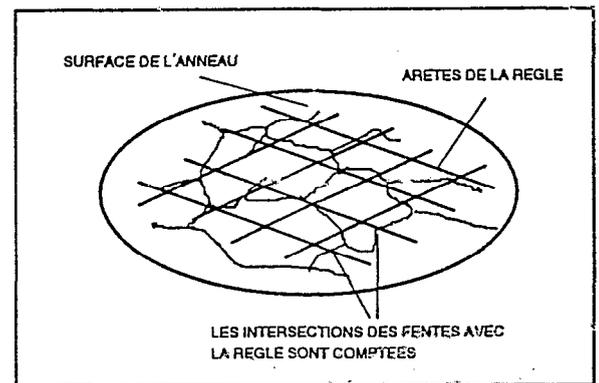


Figure 7: Comptage des fentes

Transport du sel

Succions et solutions utilisées :

Les infiltrations ont été réalisées à trois succions: une infiltration à 2 cm, une à 8 cm et trois à 14 cm. La même quantité d'eau a été infiltrée à chaque fois (28.3 mm, valeur conditionnée par la dimension des infiltromètres). Cette quantité était composée de deux parties, de l'eau distillée et une solution saline concentrée, dans les proportions données dans le tableau. D'abord, l'eau distillée était infiltrée, suivie de la solution saline. La conductivité électrique de la solution a été mesurée sur le terrain. La concentration a

Succion	Rapport eau saline sur eau totale
8 cm	0.0 (distillée seulement)
2 cm	0.2
8 cm	0.2
14 cm	0.2
8 cm	0.5

Tableau 3: Valeurs caractéristiques des infiltrations

La concentration a

été déterminée en reconstituant la solution au laboratoire. La solution était constituée de NaCl et $MgCl_2 \cdot 10H_2O$, dans les concentrations suivantes:

NaCl 108 g/l = 1850 meq/l
 $MgCl_2 \cdot 10H_2O$ 53 g/l = 520 meq/l

Prise des échantillons, mesure de la teneur en eau

Avant l'infiltration, la surface du sol a été nivelée pour utiliser un minimum de sable (2 ou 3 mm). Après l'infiltration, des échantillons ont été prélevés. Le sol a été enlevé à l'aide d'un couteau par tranches de 0.5 à 2 cm d'épaisseur, selon les possibilités de travailler le sol (le sol sec était trop dur pour descendre en dessous de 2 cm).

Le sol ainsi prélevé a été mis dans des boîtes en aluminium pour déterminer la teneur en eau et la conductivité électrique. Les boîtes ont été fermées hermétiquement et pesées immédiatement après le prélèvement pour éviter l'évaporation. Après, les échantillons ont été séchés à 130°C à l'étuve pour déterminer le poids sec.

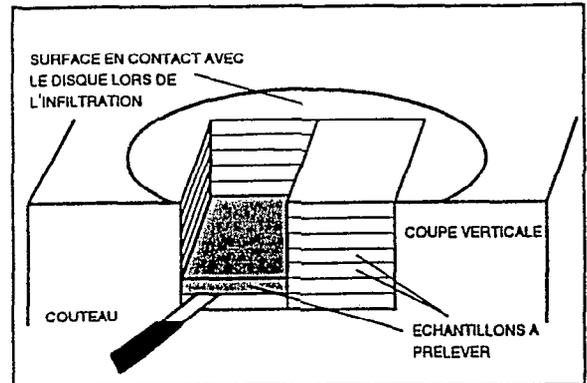


Figure 8: Prise des échantillons

Mesure de la conductivité électrique

Pour la mesure de la conductivité, 30 g de sol passés à l'étuve et 60 ml d'eau distillée ont été mélangés. Les suspensions ont été reposées pendant deux heures, pour qu'un équilibre entre la phase solide et la phase liquide puisse s'installer. Ils ont été agités trois fois, au début, après une heure et après deux heures. Le surnageant a été versé dans des petites fioles de 50 ml, où la conductivité a été mesurée. Le premier échantillon a été mesuré à plusieurs reprises pour déterminer une éventuelle dérive de la mesure au cours du temps, aucune dérive n'a été observée.

La conductivité est proportionnelle à la concentration en sel en meq/l, mais elle dépend aussi de la température. Pour corriger son effet, une solution standard a été préparée, dont la conductivité a été mesurée chaque fois que le conductimètre a été utilisé.

La conductance C (l'inverse de la résistance) est mesurée en Siemens [S] ($1 S = 1 \Omega^{-1}$). La conductance est multipliée par une constante géométrique propre à l'électrode, qui a les unités de $[cm/cm^2 = cm^{-1}]$ pour obtenir la conductivité électrique E_c [mS/cm]. La conductivité électrique est en relation avec la concentration de sel:

$$\log C [\text{meq/l}] = a + b \log E_c [\text{mS/cm}]$$

$a = 0.92 - 1.20$; $b = 1.01 - 1.05$ (à 25°C); ces valeurs changent seulement très peu selon la nature du sel.

L'appareil utilisé est le 'HI 8733 Conductivity meter' du fabricant 'HANNA instruments'. La méthode à quatre électrodes est utilisée. L'appareil mesure sur quatre gammes de 0.1 $\mu S/cm$ à 200 mS/cm.

Exploitation des données

Courbes d'infiltration

Equations de base

En ce qui concerne l'interprétation des courbes d'infiltration, la thèse de Vandervaere (1995) est un ouvrage de référence. Pour toutes les méthodes, le sol est supposé isotrope et homogène.

En régime permanent

Les méthodes courantes pour estimer la sorptivité (S) et la conductivité hydraulique (K) partent de l'équation de Wooding (1968; dans Vandervaere, 1995). Pour un potentiel h_0 légèrement négatif, le flux d'infiltration en régime permanent q_∞ s'exprime par:

$$q_\infty = K_0 + \frac{4\Phi_0}{\pi r} \quad (4.4)$$

$$\Phi_0 = \int_{h_i}^{h_0} K(h)dh \quad (4.5)$$

K_0 : conductivité à la succion h_0

Φ_0 : potentiel de Wooding à h_0

r : rayon du disque d'infiltration

h_i : succion initiale

K_i conductivité à h_i , doit être négligeable par rapport à K_0 ; le sol doit être initialement sec.

L'équation (4.4) à deux inconnues peut être résolue soit en utilisant deux rayons de disque, soit en utilisant différents potentiels.

Avec deux rayons, r_1 et r_2 , et les flux en régime permanent correspondants, q_1 et q_2 , les équations (4.4) et (4.5) peuvent être résolues pour obtenir:

$$K_0 = \frac{q_1 r_1 - q_2 r_2}{r_1 - r_2} \quad (4.6)$$

$$\Phi_0 = \frac{\pi}{4} \frac{q_2 - q_1}{1/r_1 - 1/r_2} \quad (4.7)$$

La sorptivité peut être estimée par (White and Sully, 1987; dans Vandervaere, 1995):

$$S_0 = \sqrt{\frac{\Phi_0 \Delta\theta}{b}} \quad (4.8)$$

b : $\frac{1}{2} < b < \pi/4$, généralement une valeur de 0.55 est admise (Smettem et Clothier, 1989)

$\Delta\theta$: $\Delta\theta = \theta_{\text{initial}} - \theta(h_0)$

Avec l'infiltration à deux potentiels, K_s est déterminé de la façon suivante: En utilisant la relation généralement admise entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau

$$K = K_s \exp(\alpha h), \quad (4.9)$$

l'équation (4.5) devient:

$$\Phi_0 = \frac{K_0 - K_i}{\alpha} \quad (4.10)$$

Alors, l'équation de Wooding (4.4) peut être linéarisée en prenant le logarithme:

$$\ln q_{\infty} = \ln \left(K_s \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right) \right) + \alpha h_0 \quad (4.11)$$

Avec deux valeurs de q et de h , on peut déterminer α (la pente de la droite) et K_s . Ceci est la première méthode utilisée dans ce travail.

En régime transitoire

L'autre méthode estime S_0 et K_0 avec une seule mesure d'infiltration, en utilisant le régime transitoire.

La différence entre l'infiltration monodimensionnelle et l'infiltration tridimensionnelle peut être exprimée par (Haverkamp, 1994; dans Vandervaere, 1995):

$$(I_{3D} - I_{1D}) = \frac{\gamma S_0^2}{r \Delta \theta} t \quad (4.12)$$

γ : paramètre compris entre 0.6 et 0.8

t : temps

En combinant (4.12) avec l'équation d'infiltration implicite de Parlange (1982), on obtient après simplification:

$$I_{3D} = S_0 \sqrt{t} + \left(K_i + \frac{\gamma S_0^2}{r \Delta \theta} + \frac{2-\beta}{3} (K_0 - K_i) \right) t \quad (4.13)$$

β : paramètre qui est fonction des propriétés de sol, $0 < \beta < 1$.

En remplaçant
$$A = K_i + \frac{2-\beta}{3} (K_0 - K_i) \quad (4.14)$$

et
$$B = \frac{\gamma S_0^2}{r \Delta \theta} + A \quad (4.15)$$

on peut réécrire (4.13):
$$I_{3D} = S_0 \sqrt{t} + B t \quad (4.16)$$

L'équation (4.14) se simplifie en $A = c \cdot K_0$, $1/3 < c < 2/3$, pour $K_i = 0$.

Sur cette dernière équation (4.16) se basent tous les calculs faits pour le régime transitoire. Trois transformations sont possibles pour aboutir à une forme linéaire. Les valeurs de S_0 et B sont obtenues ensuite par une régression linéaire. Ces valeurs sont comparées entre elles et examinées sur leur validité.

$$1. \frac{dI}{dt} \left(\frac{1}{\sqrt{t}} \right): \quad \frac{dI}{dt} = B + \frac{S_0}{2} \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (4.17)$$

$$2. \frac{I}{\sqrt{t}} (\sqrt{t}): \quad \frac{I}{\sqrt{t}} = S_0 + B\sqrt{t} \quad (4.18)$$

$$3. \frac{dI}{d\sqrt{t}} (\sqrt{t}): \quad \frac{dI}{d\sqrt{t}} = S_0 + 2B\sqrt{t} \quad (4.19)$$

Dans Vandervaere (1995), seulement les deux équations en \sqrt{t} (éq. 2 et 3) sont exploitées pour la régression linéaire. La fonction $dI/dt(t)$ est utilisée pour déterminer si le régime permanent est atteint. Pour obtenir les valeurs de S_0 et K , elle a été ajustée avec une méthode de régression non-linéaire. Ceci donne un poids trop fort aux premiers points. Dans ce travail, elle est aussi linéarisée, pour pouvoir appliquer la régression linéaire, mais cela n'enlève pas le problème, que les premiers points ont un poids trop fort.

Effets de la couche de sable

Les trois équations se distinguent surtout par leur comportement vis-à-vis de la couche de sable. La couche de sable introduit un certain nombre de biais dans les mesures. Au début de l'infiltration, le sable se sature en eau. L'infiltration dans le sol est retardée. L'origine du temps que nous enregistrons est alors décalée par le temps d'humectation de la couche de sable t_s , qui est inconnu. De même, les premiers millimètres infiltrés sont consommés par la couche de sable (I_s). L'infiltration mesurée est alors surestimée de cette quantité I_s , qui elle-aussi est inconnue. Un ajustement des origines peut éliminer la plus grande partie des biais causés par la couche de sable. Une certaine perturbation reste quand même, parce que les infiltrations dans le sable et dans le sol ne sont pas complètement séparées: l'infiltration dans le sol commence avant que la saturation de la couche de sable soit achevée.

Les équations qui sont obtenues par dérivation (éq. 1 et 3) ne sont pas perturbées par l'infiltration supplémentaire I_s . Avec I_s , l'équation (4.16) devient: $I = S_0\sqrt{t} + Bt + I_s$, lors de la dérivation I_s tombe. La courbe 2 par contre est fortement perturbée par I_s , ceci est la raison pourquoi Vandervaere (1995) a proposé de la remplacer par l'équation 3. Même si les premiers points sont retranchés, la régression va donner des valeurs de S et B fausses (S trop grand et B trop petit).

Le temps t_s a une influence sur toutes les courbes. Pour la courbe 2, elle est plus petite que celle de l'infiltration I_s . Pour la régression, les points, qui ne se situent pas sur la courbe, sont enlevés; alors t_s n'a pratiquement pas d'influence sur le résultat pour l'équation 1, et une influence un

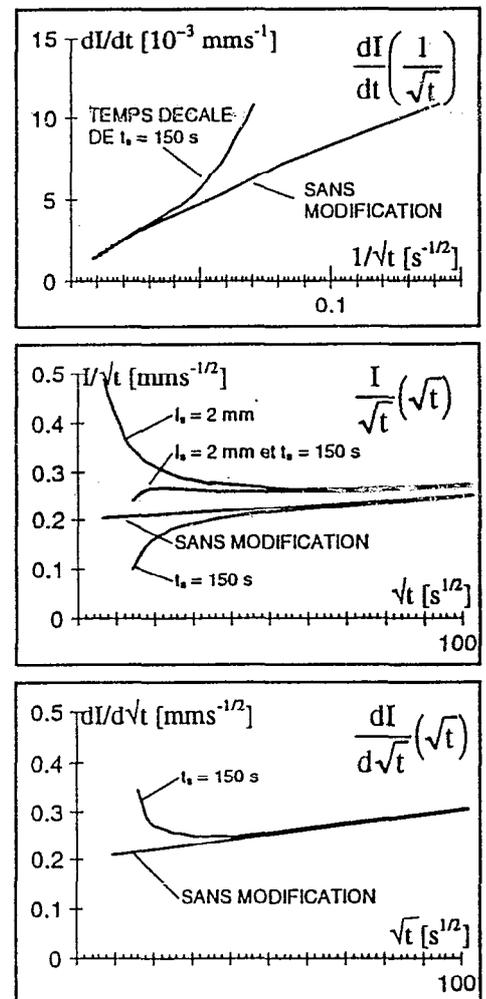


Fig 9: Simulation de l'influence de la couche de sable sur l'allure des courbes d'infiltration

peu plus importante sur la régression avec la courbe 3. Pour la courbe 2, t_s compense en partie l'effet de I_s , mais les valeurs obtenues par régression sont toujours fortement biaisées.

Traitement des données

Correction

Le premier pas dans le traitement des mesures est de ramener les échelles du temps et de l'infiltration à zéro. Ensuite, la valeur de l'infiltration lue doit être transformée en infiltration réelle selon l'équation (4.3).

Pour quelques solutions, l'infiltromètre a été rempli pendant la mesure. Si le temps est arrêté pendant le remplissage, la courbe est lisse, des corrections supplémentaires ne sont pas nécessaires.

Si par accident de l'air est rentré par la membrane, l'infiltration est sous-estimée, ces valeurs ont été supprimées. En transférant les bulles dans le réservoir, quelques mesures ont pu être sauvées.

Les erreurs causées par la couche de sable ont été corrigées seulement pour quelques points, à cause de la complexité du phénomène. Seulement dans deux cas, l'origine du temps et de la lame infiltrée a été modifiée.

Régime transitoire

La courbe $I(t)$ sur sol sec (14 cm) montre très bien la forme parabolique de la racine, pendant que la courbe $h = 2$ cm est presque une droite.

La courbe $dI/dt(1/\sqrt{t})$ à 14 cm est une droite pour toutes les solutions (figure 10.b). Les premiers points sont quelque fois aberrants et alors écartés pour la régression.

La courbe à 2 cm par contre ne suit pas bien une droite. Une rupture de pente après 15 à 30 min apparaît souvent. Pour d'autres solutions, elle est absente, ou on ne peut pas la discerner, parce que la qualité des mesures n'est pas suffisante (points initiaux faussés, points disséminés). Les deux pentes différentes peuvent s'expliquer comme suit. Dans un premier temps, le bulbe se resature ($\Delta\theta$ entre les succions 14 cm et 2 cm) avec une faible sorption (faible pente), après, le bulbe continue à s'agrandir, ce qui correspond à une sorption élevée et à une pente plus forte.

Parce que la distinction entre les deux parties de la courbe n'est pas toujours possible, la régression a été faite sur la courbe entière. Ce n'est pas grave, parce que la sorption (pente de la courbe) est seulement une grandeur de calage pour l'infiltration sur un sol déjà mouillé, et n'a plus sa signification physique. La fonction d'infiltration (éq. 4.16) ($I = S_0\sqrt{t} + Bt$) est

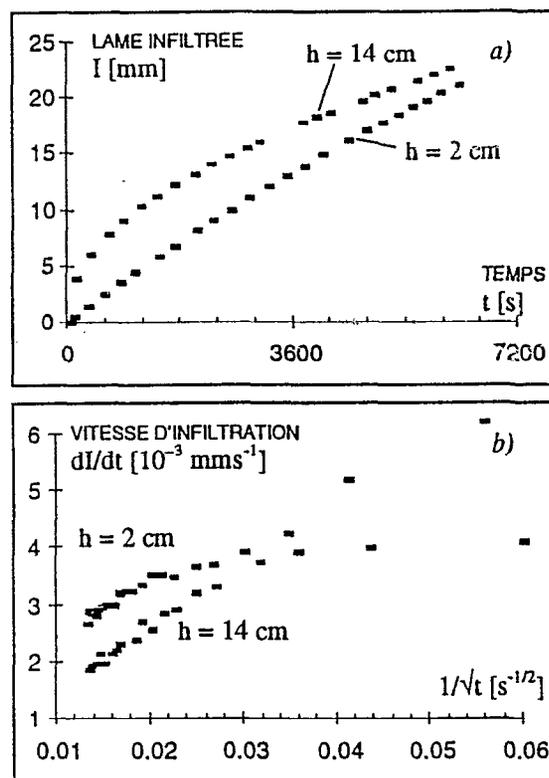


Fig. 10: a) Courbe d'infiltration $I(t)$,
b) $dI/dt(1/\sqrt{t})$, Solution 4 ($c = 1 \text{ meq/l}$,
SAR = 2) Ngaoulé

établie pour une infiltration à partir d'un disque et non pas à partir d'un bulbe d'humectation déjà présent. Une infiltration à partir d'un bulbe peut être ramenée au cas avec un disque, par une translation de l'échelle du temps. Mais ici, le temps nécessaire pour générer ce bulbe à la succion plus faible (2 cm au lieu de 14 cm) n'est pas connu. Alors, le S déterminé par calage, qui dépend de l'origine du temps, ne correspond pas à la valeur physique de S_0 .

A une succion de 14 cm, les deux courbes en racine de t sont presque identiques. A l'origine, on peut lire la valeur de S . Les pentes correspondent théoriquement à $B (I/\sqrt{t})$ et à $2B (dI/d\sqrt{t})$, mais elles ne sont pas exploitables parce que les erreurs dues à la couche de sable les perturbent trop. Elles sont souvent négatives, alors que B est strictement positif. Pour la régression, les premiers points sont souvent non utilisables, parce qu'ils ne se trouvent pas sur une droite.

Les courbes mesurées à une succion de 2 cm sont des droites qui passent par l'origine. Pour la fonction $dI/d\sqrt{t}$, la courbe est souvent aplatie aux temps élevés, ceci correspond à la rupture de pente observée dans la fig 10.2. Cependant, la courbe entière a été utilisée pour la régression. Les valeurs de S (ordonnées à l'origine) sont de mauvaise qualité, mais les valeurs de B sont utilisables.

Régime permanent

Pour pouvoir appliquer l'équation de Wooding (éq. 4.4 et 4.11), le régime permanent doit être atteint. Ceci pose un problème d'ordre pratique: le temps nécessaire est trop long. Dans le sol de Ouro Madiou, ce temps a été estimé à 7 h (De Luca, 1996). Une valeur dans la littérature (Abu-Sharar et al., 1987) indique, que sur un sol gonflant même après 50 h, le régime permanent n'était pas atteint. La fonction d'infiltration (éq. 4.16) n'admet pas de régime permanent du tout, mais elle n'est pas valable pour des temps très longs. En effet, à $t = \infty$, l'application de cette équation contredit l'équation de Wooding.

Dans notre cas, on a choisi la dernière vitesse d'infiltration mesurée (la plus basse) comme q_∞ . Ce choix est arbitraire dans la mesure où la durée de l'expérience est variable, mais il se justifie, parce qu'il n'est pas possible de donner une meilleure estimation de q_∞ .

Profils d'humidité et de salinité

La teneur en eau a été déterminée selon le procédé habituel, dont les équations sont rappelées ici:

$$\theta = V_{\text{cau}} / V_{\text{sol}} \quad (4.20)$$

$$V_{\text{sol}} = m_{\text{sèche}} / \rho \quad (4.21)$$

$$V_{\text{cau}} = m_{\text{eau}} = m_{\text{humide}} - m_{\text{sèche}} \quad (4.22)$$

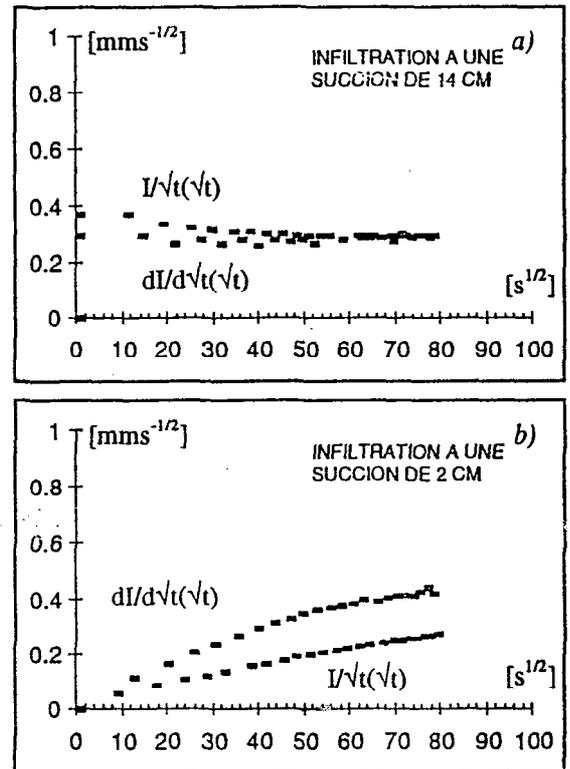


Fig 11: Courbes en fonction de \sqrt{t} ,
a) $h = 14$ cm, b) $h = 2$ cm, Solution 4
($c = 1$ meq/l, SAR = 2) Ngaoulé

$m_{\text{humide}}, m_{\text{sèche}}$: masse humide et sèche de l'échantillon

ρ : densité apparente sèche, déterminée à l'aide d'échantillons non remaniés à volume connu

La conductivité électrique peut être convertie en teneur en sel avec une relation qui a été obtenue par des mesures de calibrage avec des solutions de KCl.

$$\log c = 1.128 + 1.038 \log E_c \quad (4.23)$$

ou:
$$c = 13.4 E_c^{1.038} \quad (4.23a)$$

c est exprimé en meq/l et E_c en mS/cm

1 meq/l dans la solution de mesure correspond à 2 meq/kg sol sec

Lors de l'infiltration, l'eau saline s'est mélangée avec l'eau distillée déjà présente dans le sol. La fraction de la solution saline dans toute l'humidité (f) peut être obtenue en divisant l'augmentation de la conductivité (ΔE_c) due à l'infiltration, par la conductivité (E'_c) que l'on mesurerait si toute l'humidité était due à la solution saline.

$$f = \frac{\Delta E_c}{E'_c} \quad (4.24)$$

$$E'_c = E_{c \text{ sel}} \cdot \frac{\theta \cdot 30 \text{ g}}{60 \text{ ml}} \quad (4.25)$$

$$\Delta E_c = E_c - E_{c \text{ dist}} \quad (4.26)$$

30 g, 60 ml: masses du sol sec et de l'eau utilisés pour la mesure de la conductivité

$E_{c \text{ sel}}$: conductivité de la solution saline infiltrée, $E_{c \text{ sel}} = 150$ mS/cm

E_c : conductivité mesurée dans un profil avec infiltration de solution saline

$E_{c \text{ dist}}$: conductivité correspondante dans le profil avec infiltration d'eau distillée seulement

Cette méthode suppose (éq. 4.25) que tout le sel se dissout dans l'eau lors de la mesure, mais en réalité une partie du sel reste absorbée sur le sol.

Une teneur en eau saline peut être définie, similaire à la teneur en eau θ :

$$\theta_{\text{sel}} = \theta \cdot f \quad (4.27)$$

On peut calculer la hauteur d'eau cumulée présente dans le sol:

hauteur d'eau après infiltration $h = e \cdot \Sigma \theta \quad (4.28a)$

hauteur d'eau dans le sol sec $h_{\text{sec}} = e \cdot \Sigma \theta_{\text{sec}} \quad (4.28b)$

hauteur d'eau saline $h_{\text{sel}} = e \cdot \Sigma \theta_{\text{sel}} \quad (4.28c)$

hauteur d'eau infiltrée $h_{\text{inf}} = h - h_{\text{sec}} \quad (4.29)$

e : épaisseur de l'échantillon

Le rapport f_0 entre l'eau totale infiltrée et l'eau saline est connu (voir tableau 3). La hauteur cumulée d'eau saline a été inférieure à la valeur attendue à partir de ce rapport. Cet écart peut être expliqué en partie avec l'adsorption du sel, qui diminue la conductivité mesurée. Les valeurs θ_{sel} ont été corrigées pour satisfaire au rapport f_0 .

$$\theta_{\text{sel corr}} = \theta_{\text{sel}} \frac{h_{\text{inf}}}{h_{\text{sel}}} f_0 \quad (4.30)$$

La première valeur recherchée, la fraction mobile θ_m , est supposée égale à $\theta_{sel\ corr}$ dans la première couche de sol (voir chapitre 'bases théoriques').

Pour déterminer le coefficient de diffusion D , le profil de salinité théorique a été calculé avec une série de coefficients différents. Le profil calculé qui ressemble le plus au profil mesuré et le coefficient de diffusion correspondant ont été choisis.

Sous l'hypothèse que la diffusion moléculaire entre la phase mobile et la phase immobile soit négligeable, l'équation (3.9) se simplifie pour donner:

$$\theta_m \frac{\partial c_m}{\partial t} = \theta_m D \frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2} - q \frac{\partial c_m}{\partial z} \quad (4.31)$$

En divisant par θ_m , et en substituant $V = q / \theta_m$ et $c = c_m$, on obtient:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - V \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (4.32)$$

Dans Bresler et al. (1982) est donnée une solution analytique de cette équation, avec les conditions aux limites suivantes:

pour $t = 0$ et $z > 0$: $c = 0$

pour $t > 0$ et $z = 0$: $c = 1$

pour $t > 0$ et $z \rightarrow \infty$: $c = 0$

$$c(z, t) = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{B(1-T)}{2\sqrt{T}} \right) + \exp(B) \operatorname{erfc} \left(\frac{B(1+T)}{2\sqrt{T}} \right) \right) \quad (4.33)$$

$\operatorname{erfc}(x)$: fonction d'erreur complémentaire,

$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-\eta^2) d\eta$ (Crank, 1975)

$B = V z / D$

$T = V t / z$

$V = h_{inf} / (t \theta_m)$

La concentration dans l'échantillon de profondeur x à $x+e$ a été calculée avec la formule

$$c_{calc} = (c(z + 0.25 e, t) + c(z + 0.75 e, t)) / 2 \quad (4.34)$$

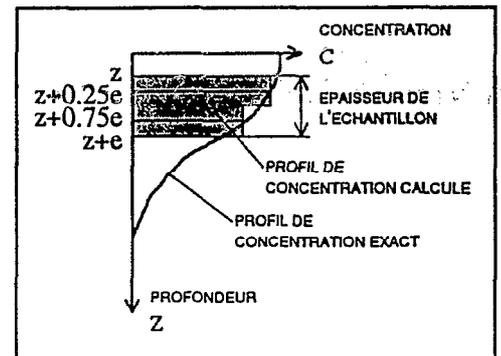


Figure 12: Explication de l'éq. (4.34)

avec t le temps nécessaire pour l'infiltration de la solution saline.

Après, les profils de c_{calc} et $\theta_{sel\ corr}$ ont été normés par rapport à la valeur maximale ($c_{calc}^* = c_{calc} / \max(c_{calc})$, de même $\theta_{sel\ corr}^* = \theta_{sel} / \max(\theta_{sel})$) et comparés entre eux pour déterminer le coefficient de diffusion D , qui reproduit le mieux les mesures.

5. Résultats

Dispersion des argiles

Dans une première partie, les résultats obtenus avec les méthodes décrites dans le chapitre précédant sont présentés. Puis, les problèmes rencontrés lors du traitement des données sont expliqués, et des améliorations des méthodes de calcul sont proposées. La qualité des résultats corrigés est discutée. Dans une dernière étape, les résultats sont interprétés et comparés à ceux présentés dans la littérature.

Résultats 'bruts'

Toutes les données brutes (mesures temps et infiltration) et les données corrigées selon les méthodes décrites dans le chapitre 'traitement des données - correction' figurent dans l'annexe. Toutes les courbes d'infiltration (selon les équations 4.16, 4.17, 4.18, 4.19) se trouvent également en annexe. Chaque solution est représentée avec deux familles de courbes; celles qui sont obtenues à partir des données corrigées avec tous les points, et celles qui sont nettoyées pour les régressions (où tous les points qui ne font pas partie d'une droite sont enlevés).

La figure 13 montre un exemple des courbes d'infiltration. Les points enlevés pour la régression ainsi que les droites de régression sont indiqués. On voit bien les déviations au début des courbes causées par la couche de sable (fig. 13.c et d).

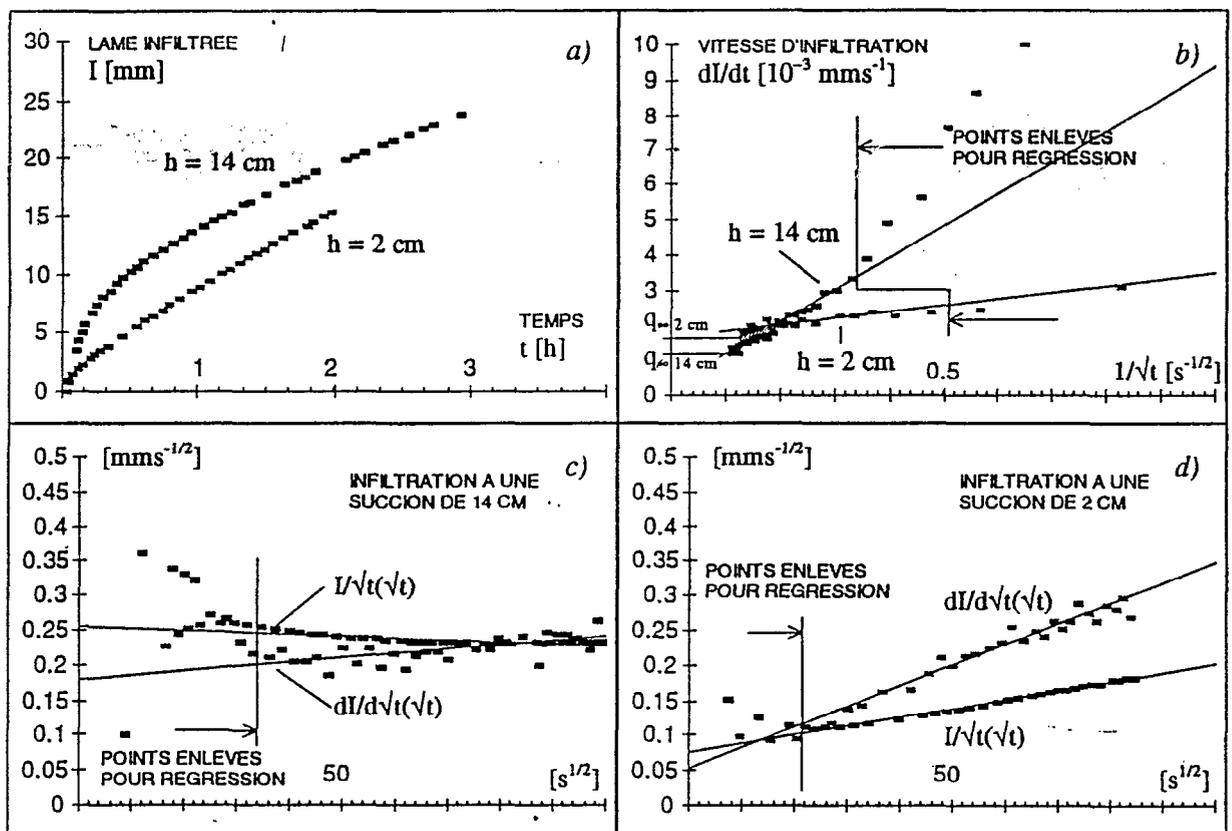


Fig.13: Courbes d'infiltration avec régression; a) éq. (4.16); b) éq. (4.15); c) éq. (4.17) et (4.18) à une succion $h = 14$; d) les mêmes équations à $h = 2$ cm; Solution S3 (1 meq/l, SAR = 1) à Ngaoulé

Méthode de Wooding

Chaque solution infiltrée donne deux valeurs de la vitesse d'infiltration en régime permanent, $q_{\infty 1}$ et $q_{\infty 2}$, à deux succions différentes, h_1 et h_2 . q_{∞} est posé égal à la moyenne des deux dernières vitesses d'infiltration (fig. 13.b). L'équation (4.11), qui donne $\ln q_{\infty}$ en fonction de h , a été appliquée pour relier ces deux points par une droite, dont la pente est égal à α et l'ordonnée à l'origine est égal à $K_s \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right)$.

Les valeurs ainsi obtenues pour le K_s sont présentées dans le tableau et le graphique qui suivent.

Ngaoulé						Ouro Madiou						
	Concentration [meq/l]						Concentration [meq/l]					
	eau dist	1	3	10	30		100	eau dist	1	3	10	30
	0.357						0.504*					
0	0.657	0.563				0	1.634	1.662				
S 1	0.310	0.548				S 1	1.432*	1.291				
2	0.605	0.848	0.700			2	1.211*	1.839	1.781			
A 5		1.497	0.798			A 5		2.161	1.531			
10			1.853	0.962		10			1.709	3.032		
R 20				1.181	1.058	R 20			1.367	2.165	1.526	
40	conductivité hydraulique			0.826	1.368	40				1.686	1.252	
80	K_s [10^{-3} mm/s]				0.430	80	* valeurs corrigées					1.165

Tableau 4: Valeurs de conductivité hydraulique obtenus par la méthode de Wooding

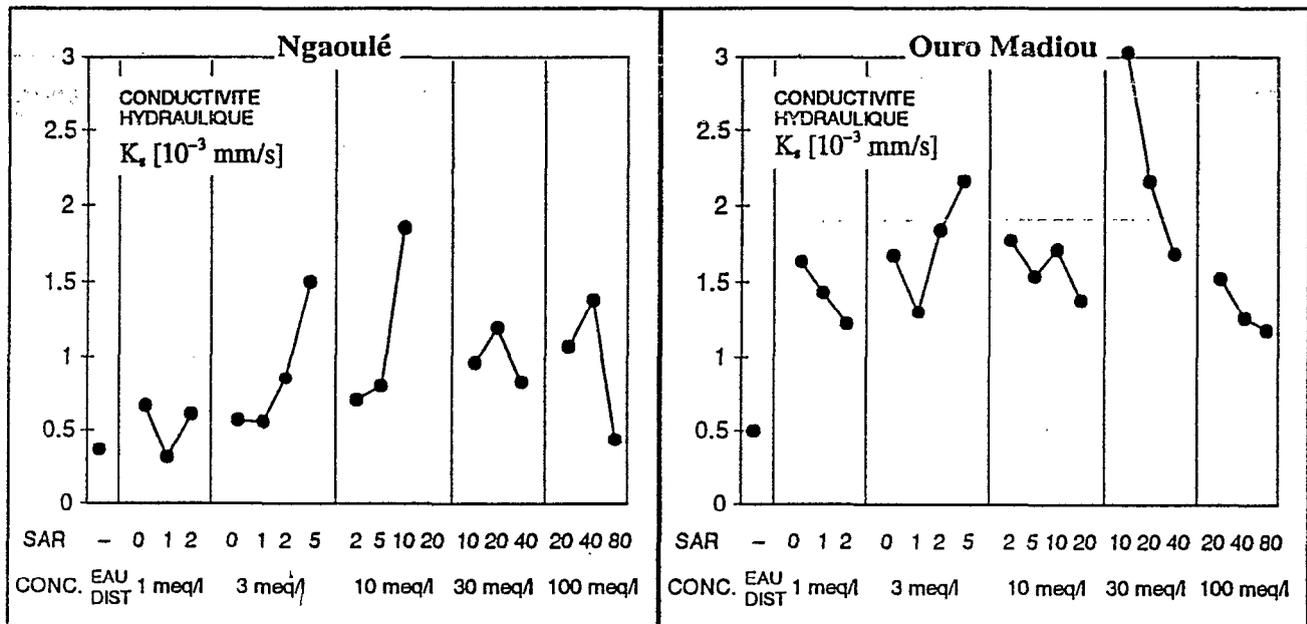


Fig. 14: Représentation graphique

Corrections

Pour plusieurs solutions (marquées par une astérisque dans le tableau 4) les valeurs de K_s ont été corrigées. En effet, les valeurs de q_{∞} pour les deux suctions étaient presque égales, ou même plus élevées pour la succion plus forte. Les valeurs de α pour ces infiltrations sont trop petites, et les K_s , qui sont déterminés à partir de α , sont aberrantes. Ceci ne concerne que les solutions qui ont été infiltrées aux suctions 8 et 2 cm, les deux suctions sont trop proches.

La correction a été faite de la manière suivante: La valeur de α aberrante a été substituée par une valeur moyenne de α , obtenue à partir des autres essais. Le paramètre α est une propriété intrinsèque du sol (cf. éq. 4.9), qui peut varier avec une modification de la structure du sol. Dans notre cas, ce remplacement est justifié, parce que les valeurs se trouvent dans une même fourchette, et aucune relation entre α et les solutions appliquées n'est apparente.

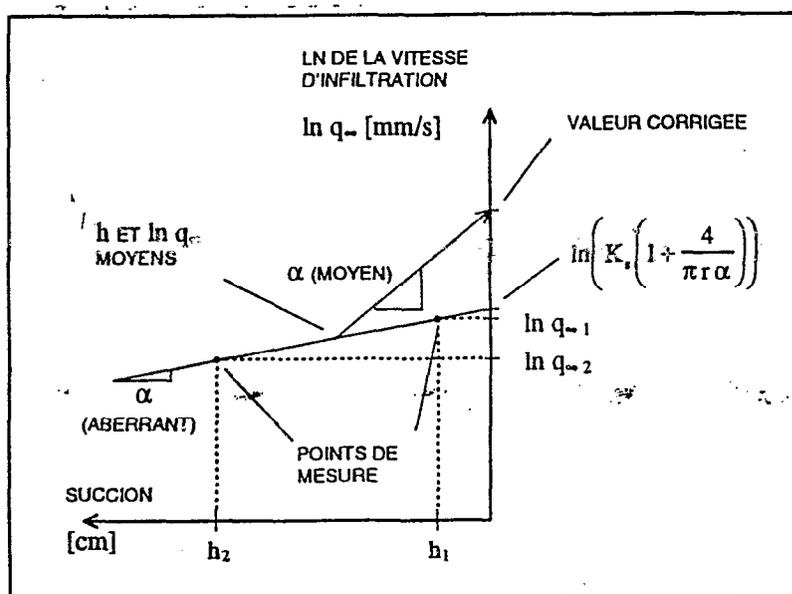


Fig. 15: Explication du calcul et de la correction de K_s .

Pour la solution 3 ($SAR = 1$, $c = 1$ meq/l), c'est la mesure à la succion de 8 cm qui était fautive, pour les deux autres solutions, il n'est pas évident de déterminer laquelle des deux valeurs de q_{∞} était aberrante. Pour la solution 3, la droite a été passée par le point de mesure à la succion de 2 cm, pour les deux autres solutions elle a été passée par le point représenté par la moyenne de h et $\ln q_{\infty}$, ce qui ne donne pas de préférence à une des deux mesures.

L'erreur sur α est engendrée par l'erreur attachée à q_{∞} . Les raisons de ces aberrations ne sont pas connues, par contre il y a une source d'erreur systématique. Comme expliqué auparavant, il n'était pas possible d'atteindre le régime permanent. Ceci résulte dans une surestimation de q_{∞} . Comme les infiltrations aux deux suctions différentes n'ont pas les mêmes caractéristiques, l'importance de l'erreur peut être différente, et alors avoir un effet imprévisible sur la pente de la courbe (α) et K_s . Il faut être conscient de ces imprécisions lors de l'interprétation des résultats. Une estimation de l'importance de ces erreurs serait intéressante, mais elle n'a pas été faite, faute de temps.

Méthode du régime transitoire

Les trois valeurs de S et B, issues de la régression des trois fonctions (éq. 4.17, 4.18 et 4.19), ont été moyennées pour le calcul de K_0 (conductivité hydraulique à la succion h_0). Les valeurs de $K_{2\text{ cm}}$ et $K_{14\text{ cm}}$ obtenues avec ces deux suctions sont représentées dans la figure 16.

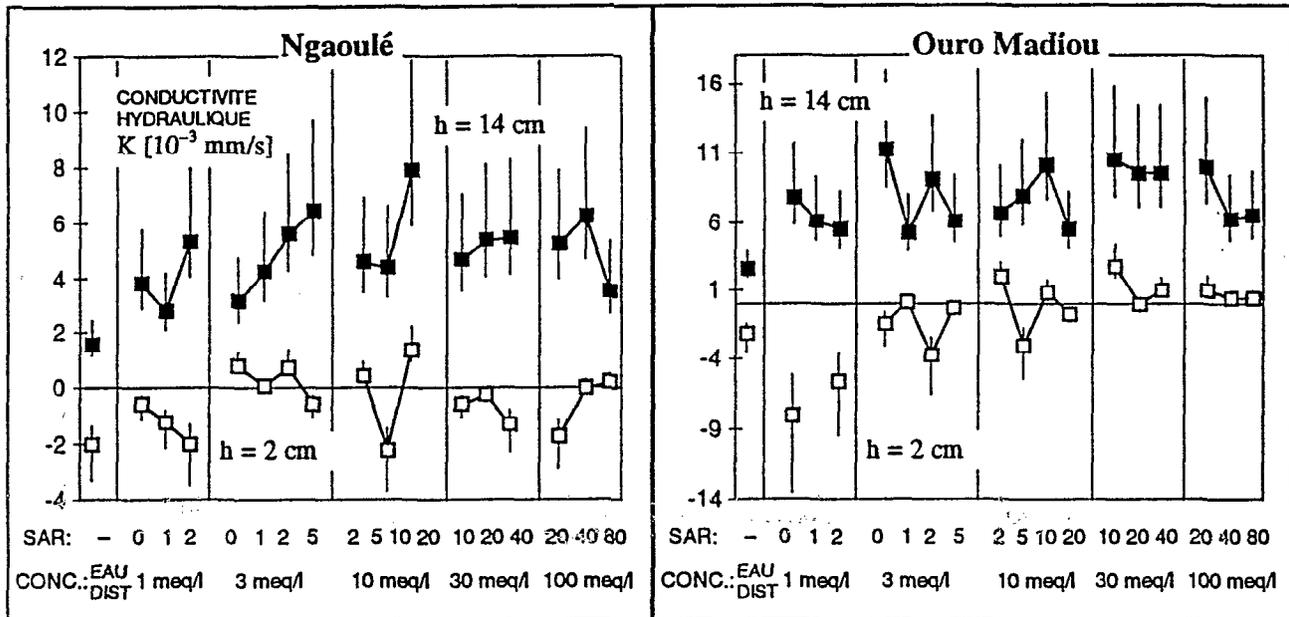


Figure 16: valeurs de K pour Ngaoulé et Ouro Madiou obtenus par la méthode du régime transitoire

Analyse des erreurs

Imprécision des formules

Les barres d'erreur représentent l'imprécision de K_0 due aux coefficients β et γ . Les gammes de variation pour β et γ sont: $\beta \in [0, 1]$, $\gamma \in [0.6, 0.8]$. La valeur représentée dans le graphique est calculée avec $\beta = 0.5$ et $\gamma = 0.7$. Les barres d'erreur donnent le maximum et le minimum de K_0 avec β et γ variant dans ces intervalles. Les paramètres β et γ interviennent dans le calcul de K_0 à travers des équations 4.14 et 4.15, celles-ci deviennent, si elles sont résolues pour A et K_0 :

$$(4.15): \quad A = B - \frac{\gamma S_0^2}{r \Delta \theta} \quad (5.1)$$

$$(4.14): \quad K_0 = A \frac{3}{2 - \beta} - K_i \underbrace{\frac{1 + \beta}{3}}_0 \quad (5.2)$$

K_i est égal à zéro pour un sol initialement sec (conductivité négligeable)

Imprécision de la régression

A cette erreur s'ajoute encore l'imprécision sur les valeurs de S et B obtenues par la régression. En effet, des imprécisions importantes sont liées aux paramètres S et B. Le tableau à côté montre les valeurs moyennes de S et B et la moyenne des écarts-type correspondants (écart-type estimé avec les trois valeurs issues de la régression).

On peut observer des erreurs particulièrement importantes pour B à une succion de 14 cm et pour S à une succion de 2 cm. Les sources d'erreur sont principalement dues aux effets de la couche de sable (voir chapitre correspondant).

Ngaoulé		
	S [mms ^{-1/2}]	B [10 ⁻³ mms ⁻¹]
h = 14cm	0.19±0.03	0.37±0.3
h = 2 cm	0.045±0.02	2.4±0.2
Ouro Madiou		
	S [mms ^{-1/2}]	B [10 ⁻³ mms ⁻¹]
h = 14cm	0.25±0.05	0.89±0.5
h = 2 cm	0.065±0.02	3.9±0.3

Tableau 5: Ordre de grandeur des erreurs sur S_0 et B

Propagation des erreurs

Ces erreurs s'amplifient pendant le calcul de K, parce que celui-ci se fait par soustraction (éq. 5.2).

A une succion $h_0 = 14$ cm, la conductivité hydraulique est très faible, pratiquement tout l'écoulement est entretenu par le gradient d'humidité (sorptivité élevée). La faible conductivité et les erreurs citées auparavant font que la valeur calculée est souvent négative. Le rapport entre S et B est défavorable pour une bonne estimation de K (S grand et B petit). Pour que K soit plus grand que zéro, l'équation (5.1) interdit des valeurs de B inférieures à $\gamma S_0^2 / (r\Delta\theta)$. Une sous-estimation de B, ou une surestimation de S_0 (qui est élevé au carré) conduit à un K négatif.

Pour la succion à 2 cm, le rapport entre B et S est plus favorable. Le S, qui a une plus grande variance est petit par rapport à B, ainsi l'erreur sur K est moins importante. Par contre, un autre problème se pose quant à l'application de l'équation (5.2). Comme déjà évoqué avant (page 22), l'équation d'infiltration (4.16) ($I = S_0\sqrt{t} + Bt$) est établie pour l'infiltration à partir d'un disque, et non à partir d'un bulbe d'humectation déjà présent. Le S obtenu par calage ne correspond pas à la sorptivité, et n'a pas de valeur physique. Le remplacement de S obtenu par régression dans le terme $\gamma S_0^2 / (r\Delta\theta)$ de l'équation (5.2) donne une erreur systématique au résultat.

Améliorations possibles de la méthode pour déterminer S et B:

Le seul moyen d'intervenir pour diminuer les erreurs est une amélioration de la méthode de régression. Il n'y a pas de possibilité de déterminer β ou γ , et de diminuer ainsi ces imprécisions.

Ajustement des origines

L'erreur la plus importante est sans doute due à la couche de sable. Il est possible d'ajuster les origines, et ainsi corriger pratiquement tout les effets de la couche de sable. L'ajustement se fait d'abord sur le temps pour rendre la fonction (4.19) linéaire, ensuite l'origine de l'infiltration est corrigée, pour ajuster la fonction (4.18) sur une droite. Ces courbes corrigées sont utilisées pour la régression.

$$\frac{I}{\sqrt{t}} = S_0 + B\sqrt{t} \quad (4.18)$$

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} = S_0 + 2B\sqrt{t} \quad (4.19)$$

Avec cette méthode, il est possible de ramener les deux courbes à une droite pour pratiquement toutes les solutions. Souvent, il est difficile de choisir quels sont les meilleurs ajustements, mais l'effet sur les valeurs de S et B est quand même petit.

Calcul d'erreur

La méthode de calcul d'erreur, qui est appliquée dans ce travail, n'est pas rigoureuse. En effet, pour pouvoir estimer un écart-type d'un ensemble de valeurs, il faut qu'elles soient issues de la même population, et que ce soient des réalisations indépendantes de cette variable aléatoire. Les deux hypothèses ne sont pas satisfaites pour le cas traité. Les trois estimations de S et K par régression sont dépendantes (car issues des mêmes données) et ne sont pas des réalisations de la même variable aléatoire (obtenues avec trois méthodes différentes).

Par contre, il est possible de déterminer les intervalles de confiance pour les paramètres obtenus par régression. Par un calcul de propagation des erreurs, l'erreur sur K peut être estimée plus précisément que par la méthode appliquée.

Calcul numérique des dérivées

Deux améliorations au calcul numérique des dérivées peuvent être faites:

- *Calcul du temps correspondant à la dérivée*

Dans l'équation (4.17)
$$\frac{dI}{dt} = B + \frac{S_0}{2} \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (4.17)$$

dI/dt est calculé par:
$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_i = \frac{I_{i+1} - I_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (5.3)$$

Dans le calcul effectué, $(dI/dt)_i$ est mis en relation avec t_i , tel que:

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_i = B + \frac{S_0}{2} \frac{1}{\sqrt{t_i}} \quad (5.4)$$

Ceci n'est pas strictement juste et entraîne un biais dans l'estimation de S et B. Pour recourir à cette imprécision, il faut remplacer $\frac{1}{\sqrt{t_i}}$ par $\frac{1}{\sqrt{(t_i + t_{i+1})/2}}$.

• *Lissage des courbes*

En général, la qualité des données est assez bonne pour permettre une régression sans lissage des courbes des dérivées (4.17, 4.19), mais dans quelques cas il serait mieux de procéder à un lissage. Le lissage peut se faire en moyennant toujours les deux valeurs qui se suivent, ou mieux par la formule suivante:

$$dI_{i \text{ lissé}} = \frac{dI_{i-1} + 2dI_i + dI_{i+1}}{4}, \text{ pour un temps } t_i \left(dI_i = \left(\frac{dI}{dt} \right)_i \right) \quad (5.5)$$

Améliorations appliquées

Pour quelques mesures, des ajustements de l'origine ont été faits. Le calcul numérique de la dérivée a été amélioré comme décrit ci-dessus.

La figure 17 montre les anciennes valeurs et les valeurs corrigées de K pour quelques infiltrations à Ngaoulé. Ici, les barres d'erreur représentent l'imprécision de la régression, et non l'imprécision due à ce que l'on ne parvient pas à déterminer les paramètres β et γ (comme c'est le cas pour la figure 16).

La différence des valeurs des points corrigés et non-corrigés n'est pas très importante pour $h = 2$ cm, les K corrigés sont simplement un peu plus grands. Les K à une succion de 14 cm par contre sont moins souvent négatifs et l'erreur issue de la régression est beaucoup plus petite. Elle a été diminuée assez pour devenir négligeable devant l'incertitude due aux valeurs de β et γ .

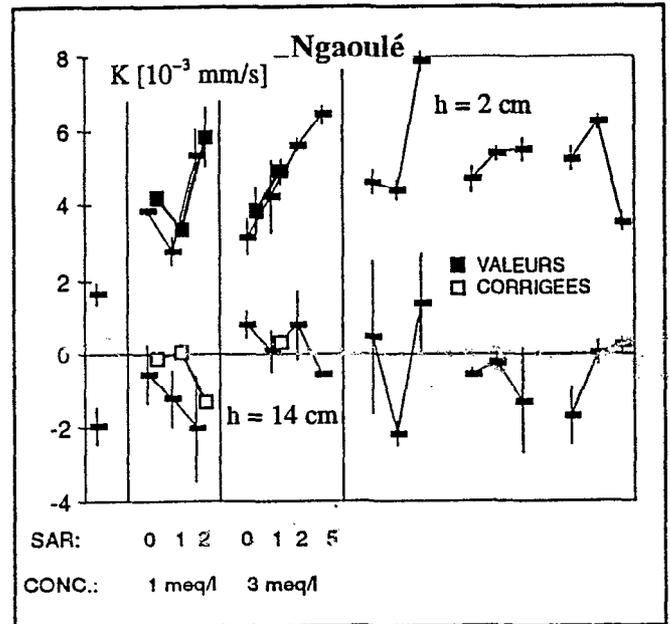


Figure 17: Valeurs corrigées de K pour quelques solutions

Comptage des fentes

Le comptage des fentes n'a pas donné des résultats intéressants. Il n'est pas possible, d'observer une relation entre le nombre de fentes et le type de solution infiltrée. Les résultats sont donnés en annexe.

Comparaison des deux méthodes de dépouillement

Malgré toutes les imprécisions liées aux deux méthodes de dépouillement, on retrouve une bonne correspondance entre les deux.

En comparant les valeurs de $K_{2 \text{ cm}}$ déterminées par la méthode du régime transitoire aux K_s obtenus par la méthode de Wooding, elles diffèrent seulement dans l'ordre de grandeur, mais ils ont un comportement tout à fait similaire (voir fig. 18). La méthode transitoire donne des valeurs de K 4 à 5 fois plus élevés que la méthode de Wooding. Il est habituel que les différentes méthodes de dépouillement donnent des valeurs considérablement différents. Le

travail de Cook et al. (1994), qui compare six méthodes différentes est un bon exemple. Ceci est dû aux nombreuses hypothèses et simplifications pour aboutir aux équations appliquées.

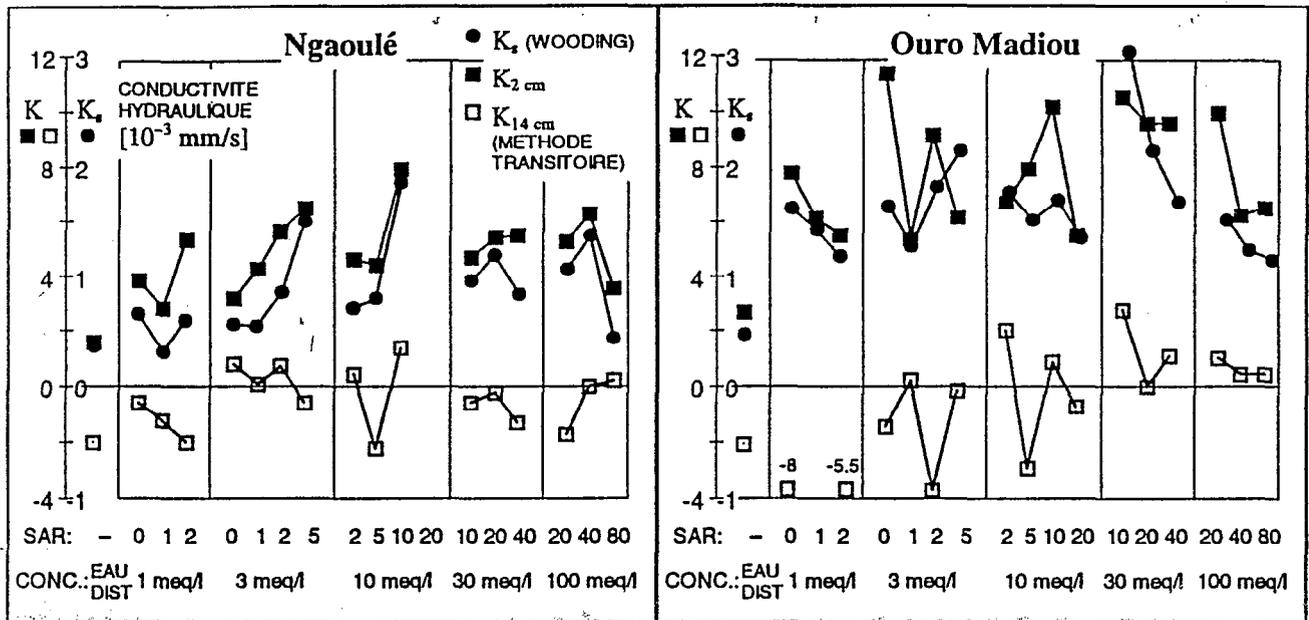


Figure 18: Valeurs de $K_{2\text{ cm}}$ et $K_{14\text{ cm}}$ (régime transitoire) et valeurs de K_s (méthode de Wooding)

Changement de la conductivité en fonction de la concentration et du SAR

En se basant sur les résultats résumés dans la figure 18, on peut faire les observations suivantes:

Les résultats pour Ouro Madiou ont relativement beaucoup de bruit, mais deux tendances apparaissent.

- La conductivité hydraulique diminue avec un SAR croissant pour les trois séries.
- La conductivité hydraulique diminue aux concentrations faibles. Cette tendance est nette seulement pour la concentration la plus faible à $c = 1\text{ meq/l}$.

A Ngaoulé les séries de K_s et $K_{2\text{ cm}}$ ont moins de bruit, et elles ont un comportement nettement différent de $K_{14\text{ cm}}$.

- Pour les $K_{14\text{ cm}}$, les mêmes observations peuvent se faire qu'à Ouro Madiou. La conductivité est plus faible pour des SAR plus élevés et pour une concentration de 1 meq/l .
- Les deux autres séries, K_s et $K_{2\text{ cm}}$, montrent un comportement tout à fait particulier: à toutes les concentrations sauf la plus forte, la conductivité hydraulique augmente nettement si le SAR augmente.
- D'ailleurs, la conductivité hydraulique est plus faible aux concentrations faibles

Interprétation des résultats

Le sol de Ouro Madiou a montré le comportement classique: La conductivité diminue à des SAR forts et des concentrations faibles. Cependant, il n'est pas possible de déterminer, s'il y a un comportement de seuil. Pour ceci, il aurait fallu faire des mesures à des SAR plus élevés aussi pour les faibles concentrations.

Par contre, le comportement du sol de Ngaoulé est différent de ce à quoi l'on peut s'attendre. L'augmentation de la conductivité hydraulique avec un SAR plus élevé n'a pas été observée auparavant.

Il serait intéressant de déterminer, pourquoi le sol se comporte ainsi. Dans une recherche plus approfondie, il faudra essayer de répondre à cette question. Des mesures à des valeurs de SAR plus élevées vont aussi être entreprises pour déterminer le comportement au-delà des conditions investiguées dans ce travail.

Deux explications sont possibles:

- Le sol était dans un état structural dispersé, tel que les solutions ont eu un effet stabilisant malgré les SAR assez élevés.
- Le phénomène est lié au gonflement, dont l'effet sur la conductivité hydraulique en présence de différentes solutions est mal connu. Avec les solutions à SAR plus élevés, le gonflement est plus important, et donc aussi le retrait. La porosité supplémentaire due au retrait plus important peut avoir causé l'augmentation de la conductivité hydraulique.

Enfin, dans une prolongation de ce travail, il serait important de reprendre les protocoles appliqués par Curtin ou Araguës, pour être en mesure de comparer la réaction du sol remanié en lit d'agrégats à celle observée avec notre protocole.

Transport du sel

Profils d'humidité et de conductivité électrique

Les profils d'humidité et de conductivité sont tous de bonne qualité. Un profil par site est présenté ici sous titre illustratif, parce qu'ils se ressemblent beaucoup et qu'ils n'ont pas été exploités sous cette forme. La première valeur de θ du profil de Ouro Madiou est plus faible, parce que cette couche contient la couche de sable de contact, à Ngaoulé, le sable a été enlevé pour les prélèvements. La sixième valeur du même profil est aberrante.

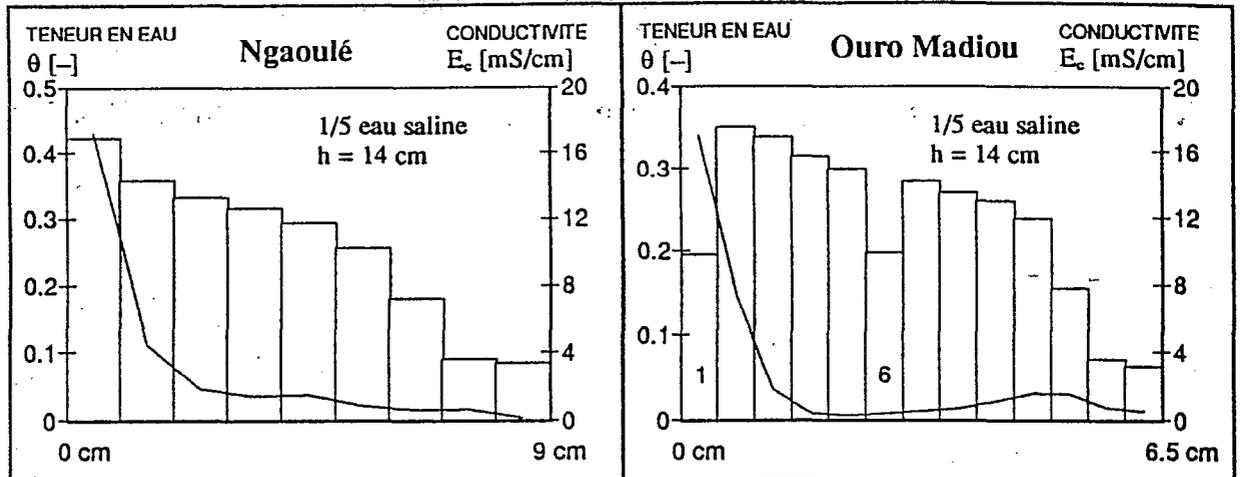


Figure 19: Profils de teneur en eau et de salinité

Lessivage des sels avec l'eau percolée

Une partie des sels présents dans le sol est dissoute dans l'eau percolante et entraînée avec elle. Ce sel s'accumule à la limite du bulbe d'humectation, et cause une augmentation locale de la conductivité électrique.

A Ouro Madiou, ce front d'accumulation des sels lessivés est nettement visible dans tous les profils. La figure 20 montre la partie correspondante des profils. Une grande partie des sels a été entraînée avec la solution.

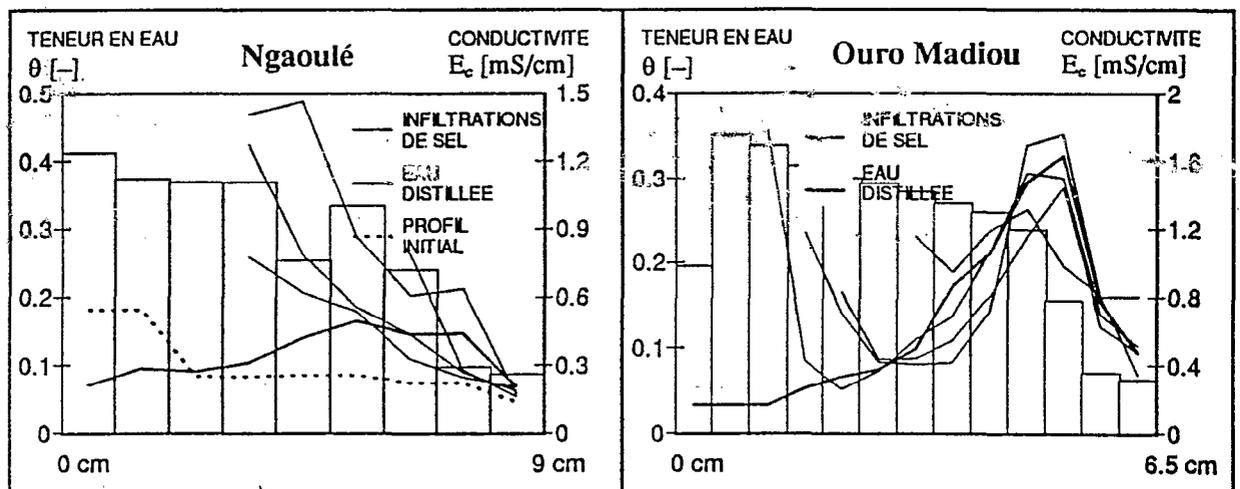


Figure 20: Profils de conductivité électrique, front d'accumulation des sels lessivés à Ouro Madiou

Sur les profils de Ngaoulé, il n'était pas possible de discerner ce front d'accumulation, la concentration des sels est plus faible que à Ouro Madiou et ils sont moins facilement entraînés avec l'eau. Sur le profil d'infiltration d'eau distillée uniquement, il y a une faible augmentation de la conductivité sur la limite du bulbe. Dans les autres profils, elle n'est pas apparente. La solution saline qui a été infiltrée a progressé jusqu'à l'extrémité du bulbe d'humectation. La comparaison des profils de conductivité du sol sec et du sol percolé avec de l'eau distillée uniquement, suggère que seuls les sels accumulés à la surface sont lessivés.

Simulation

A partir des profils de la teneur en eau et de la salinité, on a calculé les profils de teneur en eau infiltrée ($\theta_{inf} = \theta - \theta_{sec}$, différence d'humidité entre le sol humecté et le sol sec) et en eau saline (θ_{sel} , calcul expliqué dans la partie 'méthodes et matériel'). Dans la figure 21 sont représentés les profils des mêmes infiltrations comme dans la figure 19.

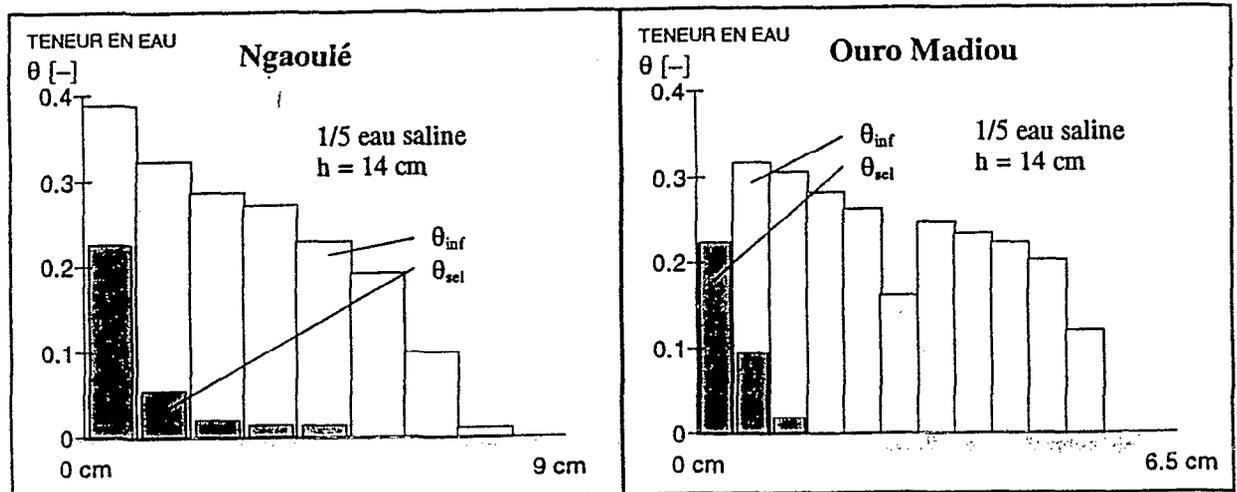


Figure 21: Profils de teneur en eau infiltrée et teneur en eau saline

Pour la simulation, la première valeur (qui correspond à la couche de sable) a été enlevée et les valeurs de θ_{sel} ont été normalisées, tel que la valeur maximale soit égale à un. Ensuite, des profils ont été simulés à l'aide de la fonction (4.33) avec des coefficients de diffusion variables. Les autres paramètres intervenants, le temps t et la vitesse de la solution V dans le sol sont donnés. Le temps est égal au temps d'infiltration de la solution saline, la vitesse se calcule selon: $V = h_{sel} / (t \theta_m)$, où h_{sel} est la hauteur cumulée d'eau saline présente dans le sol, et θ_m la fraction mobile. La figure 22 montre le profil de θ_{sel} normalisé et les profils générés par simulation.

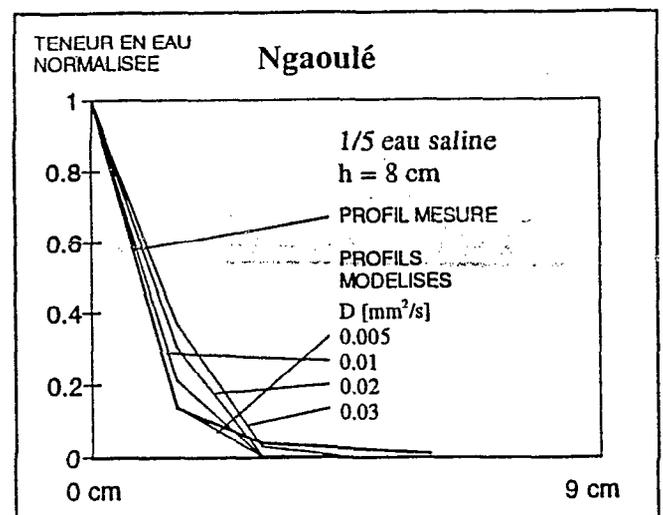


Figure 22: Profils de θ_{sel} normalisé et des simulations correspondantes

Il est très difficile à déterminer lequel des coefficients de diffusion D représente le mieux la réalité. Le choix a été fait en disposant seulement des tableaux avec les chiffres. Le choix n'est pas évident, et toujours entamé d'une grande partie de subjectivité. Souvent aucune des simulations représentait bien le profil mesuré. A Ouro Madiou, il n'était pas possible de trouver un ajustement pour les infiltrations aux succions de 2 et de 14 cm avec la valeur de θ_m donnée. Pour arriver à une simulation valable, θ_m a été posé à 0.2 (Proche de la valeur de l'infiltration à

8 cm, où $\theta_m = 0.193$). Ainsi, des valeurs de D ont pu être estimées. Les valeurs de θ_m et de D obtenus pour les quatre infiltrations sont représentées dans le tableau 6.

Discussion

Avant de regarder les résultats plus en détail, il faut apporter des critiques importantes à la méthode de simulation utilisée.

Tout d'abord, comme les profils simulés ont été comparés aux profils expérimentaux par un ajustement visuel, les résultats ont forcément une grande imprécision. En plus, l'estimation de précision insuffisante de θ_m a posé des problèmes. Pour obtenir des résultats plus fiables, il faut faire un ajustement sur θ_m et D en même temps, en utilisant un algorithme mathématique pour trouver les meilleures valeurs.

Le modèle n'est pas assez adapté. Il ne prend pas en compte la diffusion moléculaire entre les phases mobile et immobile. La séparation de la solution du sol en phase mobile et en phase immobile est trop simpliste. Pour le sol à Ngaoulé, une petite partie de la solution avance très vite dans le sol, pour atteindre le front d'humectation même si la solution saline ne représente que 20% de l'eau infiltrée, le reste de la solution correspond assez bien au modèle. Pourtant, la petite fraction qui se déplace vite est essentielle pour pouvoir décrire la dynamique du sel dans le sol.

Ngaoulé				
Quantité d'eau saline	Succion	θ	θ_m	D [mm ² /s]
1/5 eau saline	14 cm	0.423	0.238	0.02
1/5 eau saline	8 cm	0.413	0.251	0.03
1/5 eau saline	2 cm	0.410	0.280	0.1
1/2 eau saline	8 cm	0.372	(0.345)	0.03
Ouro Madiou				
Quantité d'eau saline	Succion	θ	θ_m	D [mm ² /s]
1/5 eau saline	14 cm	0.350	0.148	0.005
1/5 eau saline	8 cm	0.370	0.193	0.012
1/5 eau saline	2 cm	0.347	0.164	0.015
1/2 eau saline	8 cm	0.356	(0.373)	0.008

Tableau 6: Valeurs de θ_m et de D

Les valeurs trouvées pour le coefficient de diffusion D sont cohérentes avec les succions appliquées, c'est-à-dire, pour les succions plus faibles, où la taille maximale des pores mouillées et la vitesse d'écoulement augmente, la diffusion est plus importante. A Ngaoulé, la fraction mobile θ_m est plus grande pour les faibles succions, où plus de pores sont disponibles à l'écoulement. A Ouro Madiou par contre, les valeurs de θ_m varient trop et elles n'ont pas été utilisables pour la simulation.

Les valeurs obtenues pour D se situent sur une large gamme, elles sont presque un ordre de grandeur plus petites à Ouro Madiou. Cette différence est en relation avec la structure du

sol et de la porosité. A Ngaoulé, le sol est structuré en agrégats et sous-agrégats, lorsque le sol de Ouro Madiou a une structure homogène, et en plus, les pores grandes sont inefficaces, car vésiculaires. Les valeurs de D obtenus à Ouro Madiou sont sensiblement les mêmes que celles mesurées sur le même sol par une autre méthode au laboratoire de pédologie à l'ORSTOM: $8.3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ (communication personnelle C. Hammecker).

La diffusion convective mesurée est entre 10 et 200 fois plus importante que la diffusion moléculaire. Celle-ci est égale à $1.85 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ pour Cl^- dans de l'eau à 25°C . Dans un sol saturé, elle est plus faible d'un facteur 0.2 à 0.3 (Porter, 1960). Dans le sens du flux, la diffusion moléculaire est alors largement négligeable par rapport à la diffusion convective. Par contre, la diffusion moléculaire est importante pour les transferts de sel entre la phase mobile et la phase immobile. Ceci se montre dans l'accroissement de la teneur en eau saline dans la première couche de sol (θ_m) pour les infiltrations, où le sol a été plus longtemps en contact avec la solution saline (1/2 eau saline). Comme cette valeur trop élevée de θ_m a été utilisée pour les simulations, le D obtenu ne correspond pas à la situation réelle. Même si les paramètres θ_m et D sont déterminés avec une méthode de simulation améliorée, elles ne représentent pas les valeurs réelles, elles satisfont seulement la simulation. L'augmentation de θ_m au cours du temps met aussi en cause la méthode de détermination de celui-ci proposée par Angulo-Jaramillo (1996).

Avant de continuer les mesures de ces paramètres, il serait intéressant de comparer le modèle appliqué à d'autres modèles, et de déterminer leur validité. Les exigences au modèle choisi sont dures: il doit être simple (pour pouvoir accéder aux paramètres correspondants) et en même temps bien représenter la complexité du phénomène. Le modèle de la phase mobile est déjà très complexe (il n'est pas possible de décrire analytiquement la diffusion moléculaire entre les phases), mais malgré tout, il n'arrive pas à tenir compte de tous les phénomènes (déplacements du liquide à plusieurs vitesses, écoulements préférentiels).

6. Conclusions

Evolution physique des propriétés du sol

Les comportements des sols que l'on pouvait supposer en se basant sur la théorie et la bibliographie ont été retrouvés en partie, c'est-à-dire, la conductivité hydraulique diminue avec les solutions diluées et avec un SAR croissant.

Le sol à Ngaoulé par contre a montré un comportement tout à fait imprévu, dont les raisons sont inconnues. Il faut étendre la gamme des solutions appliquées lors d'une expérience ultérieure, pour connaître la réaction du sol à ces valeurs-là, peut-être les SAR appliqués n'étaient pas assez élevés pour causer une dispersion des argiles.

Transport et diffusion des sels

Les profils d'humidité et de salinité étaient très nets grâce à des valeurs de mesures précises. L'application du modèle par contre a posé des problèmes. D'une part, la méthode mathématique n'est pas assez élaborée pour donner des valeurs fiables de la diffusivité, d'autre part, le modèle arrive très vite à ses limites. Dans une prolongation du travail, il faudrait mieux exploiter les données. Malgré cela, les valeurs de θ_m et D se situent dans des bonnes fourchettes et donnent une première idée de leur importance.

- ABU-SHARAR T.M., BINGHAM F.T., RHOADES J.D.; 1987 – Reduction in hydraulic conductivity in relation to clay dispersion and disaggregation; *Soil Sci. Am. J.*; 51:342-346
- ABU-SHARAR T.M., SALAMEH A.S.; 1995 – Reductions in hydraulic conductivity and infiltration rate in relation to aggregate stability and irrigation water turbidity; *Agricultural Water Management*; 29:53-62
- AMEZKETA E., ARAGÜES R.; 1995 – Hydraulic conductivity, dispersion and osmotic explosion in arid-zone soils leached with electrolyte solutions; *Soil Sci.*; 159:287-295
- ANGULO-JARAMILLO R., GAUDET J.-P., THONY J.-L., VAUCLIN M.; 1996 – Measurement of hydraulic properties and mobile water content of a field soil; *Soil Sci. Am. J.*; 60:710
- BOIVIN P., DIA I., LERICOLLAIS A., POUSSIN J.C., SANTOIR C., SECK S.M.; 1995A – Agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal. Une approche pluridisciplinaire; *ORSTOM Actualités*; 45:8-23
- BOIVIN P., BRUNET D., GASCUEL C., ZANTE P., NDIAYE J.P.; 1995B – Les sol argileux de la région de Nianga-Podor: répartition, caractéristiques, aptitudes et risques de dégradation sous irrigation; dans: *ORSTOM, 1995*; pp. 67-81
- BRESLER E., MCNEAL B.L., CARTER D.L.; 1982 – *Saline and Sodic Soils*; Springer-Verlag; Berlin Heidelberg New York
- CLOTHIER B.E., KIRKHAM M.B., MCLEAN J.E.; 1992 – In Situ Measurement of the Effective Transport Volume for Solute Moving through Soil; *Soil Sci. Am. J.*; 56:733-736
- COOK F.J., BOEREN A.; 1994 – Six Methods for determining sorptivity and hydraulic conductivity with disk permeameter; *Soil Sci.*; 157:2-11
- CRANK J.; 1975 – *The Mathematics of Diffusion*; Second Edition; Oxford University Press; Oxford
- CRESCIMANNO G., IOVINO M., PROVENZANO G.; 1995 – Influence of Salinity and Sodicity on Soil Structural and Hydraulic Characteristics; *Soil Sci. Am. J.*; 59:1701-1708
- CURTIN D., SMILLIE G.W.; 1995 – Effects of Incubation and pH on Soil Solution and Exchangeable Cation Rates; *Soil Sci. Am. J.*; 59:1006-1011
- CURTIN D., STEPPUHN H., SELLES F.; 1994A – Clay dispersion in relation to sodicity, electrolyte concentration, and mechanical effects; *Soil Sci. Am. J.*; 58:955-962
- CURTIN D., STEPPUHN H., SELLES F.; 1994B – Effects of Magnesium on Cation Selectivity and Structural Stability of Sodic Soils; *Soil Sci. Am. J.*; 58:730-737
- CURTIN D., STEPPUHN H., SELLES F.; 1994C – Structural Stability of Chernozemic Soils as affected by Exchangeable Sodium and Electrolyte Concentration; *Can. J. Soil Sci.*; 74:157-164
- DEGOUMOIS Y.; 1995 – Caractérisation hydrodynamique des sols encroûtés de la zone soudano-sahélienne; Travail pratique de diplôme; IATE-Pédologie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- DE LUCA A.; 1996 – Caractérisation physique des sols alluviaux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal; Travail pratique de diplôme; IATE-Pédologie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- DROUBI A.A.; 1980 – Generalised residual alkalinity concept: application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation; *Am. J. Sci.*; 280:560-572
- FAVRE F.; 1995 – Etude du ruissellement et de l'infiltration d'une toposéquence de sols vertiques de la moyenne vallée du fleuve Sénégal; Travail pratique de diplôme; IATE-Pédologie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- GUIGNARD A.; 1996 – Evolution de l'état structural des sols de la région de Podor (Sénégal) sous des contraintes chimiques de solutions percolantes; Mémoire de fin d'études; ENSA Rennes

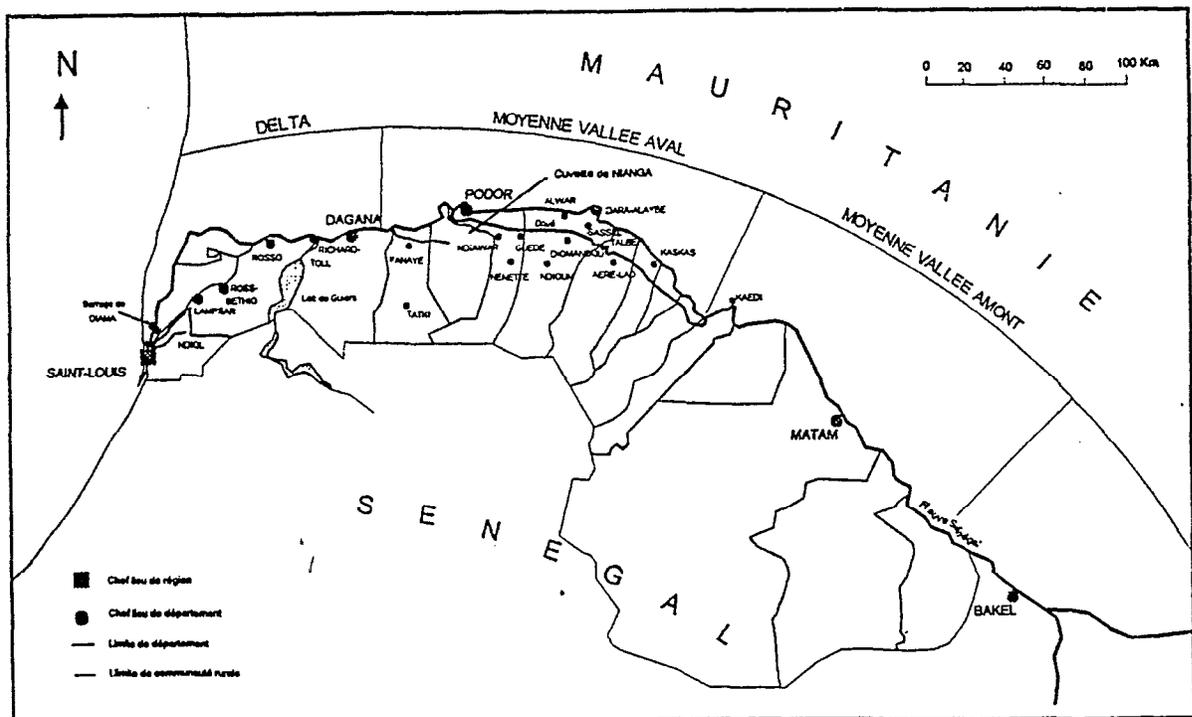
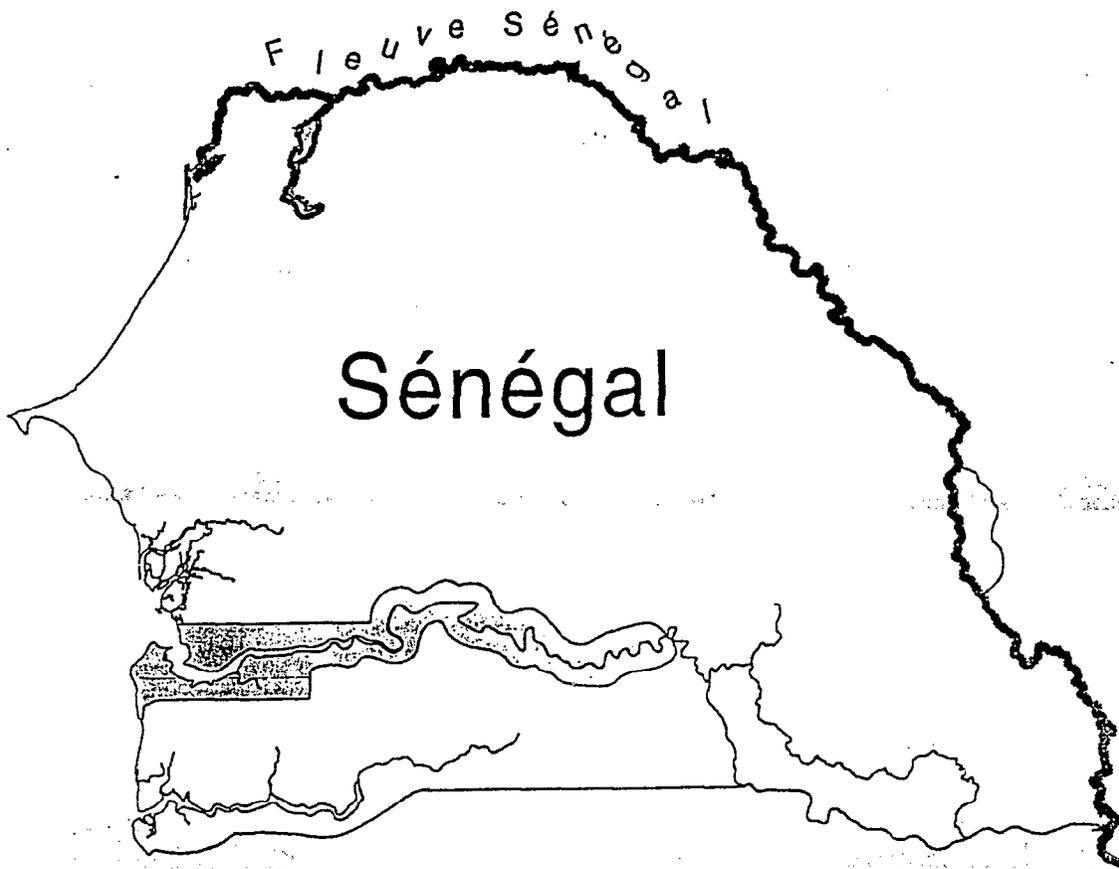
- ORSTOM; 1995 – Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal; Editeurs: BOIVIN P., DIA I., LERICOLLAIS A., POUSSIN J.C., SANTOIR C., SECK S.M.; Ateliers ORSTOM-ISRA à Saint-Louis, 19-21 octobre 1993; Editions de l'ORSTOM, Paris
- PARLANGE J.-Y., LISLE I., BRADDOCK R.D.; 1982 – The three-parameter infiltration equation; *Soil Sci.*; 133:337
- PORTER L.K., KEMPER W.D., JACKSON R.D., STEWART B.A.; 1960 – Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content; *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*; 24:460-463
- RIEU M. ET CHEVERRY C.; 1976 – Mise au point bibliographique sur quelques recherches récentes en matière de sols salés; *Cah. ORSTOM, sér. Pédologie*; 14:39-61
- SAMBA R.; 1997; à paraître – Etude du fonctionnement hydro-salin des sols de Ndiaye et de Fanaye: évaluation de la durabilité sur le plan environnemental de quelques systèmes de riziculture irriguée; Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop (ORSTOM ADRAO); Dakar
- SMETTEM K.R.J., CLOTHIER B.E.; 1989 – Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc permeameters; *J. Soil Sci.*; 40:563
- SUMNER M.E.; 1993 – Sodic Soils: New Perspectives; *Aust. J. Soil Res.*; 31:683-750
- TOUMA J., BOIVIN P.; 1988 – Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau, 2. Résultats numériques; *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*; 24:27-37
- VALLES V., PACHEPSKY A., PONIZOVSKY A.A.; 1991 – Invariant criteria for irrigation water quality assessment in arid and semi-arid regions. Genesis and control of fertility of salt-affected soils; ISSS subcommission on salt-affected soils; V.V. Dokuchaev Soil Institute, Moscow; pp.330-333
- VANDERVAERE J.P.; 1995 – Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques. Analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés.; Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble

Annexes

Cartes du Sénégal	A - 2
Tableaux des mesures d'infiltration	A - 3
Courbes d'infiltration	A - 15
K_s obtenus par la méthode de Wooding	A - 33
K obtenus par la méthode du régime transitoire	A - 34
Comptage des fentes	A - 35
Profils de sol θ , E_c , θ_{inf} et θ_{sc1} (tables)	A - 36
Profils en θ_{inf} et θ_{sc1} (graphique)	A - 38
Protocole des simulations	A - 39

Cartes du Sénégal

- Tirées de ORSTOM (1995)



Tableaux des mesures

Ouro Madiou

Solution 1				
Solution: eau distillée				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succlon $h_0 = 8$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
5500	43	0	0	0
5540	140	40	0	0
5640	192	100	2.11	
5720	205	140	2.63	
5910	230	250	3.65	
10030	243	330	4.18	
10207	256	427	4.70	
10324	266	504	5.11	
10506	277	606	5.55	
10758	294	778	6.24	
11029	307	929	6.77	
11221	316	1041	7.13	
12032	350	1532	8.51	
12406	360	1746	8.92	
12735	370	1955	9.32	
13112	382	2172	9.81	
13416	400	2356	10.54	
13840	415	2620	11.15	
14220	425	2840	11.55	
14630	437	3090	12.04	
15240	453	3460	12.69	
15720	465	3740	13.17	
21000	495	4500	14.39	
21305	502	4685	14.67	
22140	523	5200	15.52	
23145	543	5805	16.34	
23430	550	5970	16.62	
succlon $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
23720	48	0	0	0
24040	57	200	0.36	
24210	61	290	0.53	
24700	72	580	0.97	
25045	81	805	1.34	
25450	91	1050	1.74	
30225	110	1505	2.51	
30930	127	1930	3.20	
31505	140	2265	3.73	
32655	167	2975	4.82	
33400	183	3400	5.47	
34140	200	3860	6.16	
34900	216	4300	6.81	
35645	232	4765	7.46	
41115	263	5635	8.72	
42230	288	6310	9.73	
43340	308	6980	10.54	
44445	330	7645	11.43	
45555	352	8315	12.32	
50630	374	8950	13.21	
51645	394	9565	14.03	

Solution 2				
Solution: c = 1 meq/l; SAR = 0				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succlon $h_0 = 8$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
25930	31	0	0	0
30040	94	70	1.43	
30100	120	90	2.01	
30125	146	115	2.60	
30210	187	160	3.53	
30255	222	205	4.32	
30340	256	250	5.09	
30430	289	300	5.84	
30600	341	390	7.02	
30700	374	450	7.76	
30830	412	540	8.62	
30935	444	605	9.35	
31150	497	740	10.55	
31535	570	965	12.20	
31740	606	1090	13.01	
32015	651	1245	14.03	
32230	686	1380	14.83	
32530	731	1560	15.84	
32730	758	1680	16.46	
32940	790	1810	17.18	
33200	821	1950	17.88	
33730	891	2280	19.47	
34000	921	2430	20.14	
34210	946	2560	20.71	
34410	970	2680	21.25	
34530	985	2760	21.59	
34825	45	2760	21.59	
35050	73	2935	22.23	
35405	107	3080	23.00	
35645	135	3275	23.63	
35835	152	3435	24.02	
40130	180	3545	24.65	
40435	210	3720	25.33	
40735	237	3905	25.94	
41010	262	4085	26.51	
41225	281	4240	26.94	
succlon $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
41225	281	0	0	0
41325	307	60	0.59	
41555	345	210	1.45	
41910	390	405	2.47	
42115	418	530	3.10	
42300	441	635	3.62	
42540	477	795	4.44	
42930	526	1025	5.55	
43530	601	1385	7.24	
43900	646	1595	8.26	
44100	670	1715	8.80	
44330	700	1865	9.48	
44745	751	2120	10.64	
45040	785	2295	11.41	
45330	817	2465	12.13	
45525	840	2580	12.65	
45830	876	2765	13.47	
50200	915	2975	14.35	
50400	937	3095	14.85	
50715	974	3290	15.69	

Solution 3				
Solution: c = 1 meq/l; SAR = 1				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succlon $h_0 = 8$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	46	0	0	0
125	65	85	0.43	
230	76	150	0.68	
445	101	285	1.24	
540	110	340	1.45	
640	122	400	1.72	
930	155	570	2.47	
1130	177	690	2.97	
1325	218	805	3.89	
1515	228	915	4.12	
1735	260	1055	4.84	
1915	280	1155	5.30	
2100	304	1260	5.84	
2405	345	1445	6.77	
2530	364	1530	7.20	
2725	390	1645	7.79	
2855	411	1735	8.26	
3025	435	1825	8.80	
3150	462	1910	9.42	
3325	489	2005	10.03	
3450	512	2090	10.55	
3720	555	2240	11.52	
3850	580	2330	12.09	
4300	645	2580	13.56	
4430	666	2670	14.03	
4615	692	2775	14.62	
4745	712	2865	15.07	
5015	745	3015	15.82	
5300	780	3180	16.61	
5505	805	3305	17.18	
5730	834	3450	17.84	
5930	856	3570	18.33	
10325	900	3805	19.33	
10455	915	3895	19.67	
10600	927	3960	19.94	
10805	18	3960	19.94	
11005	31	4080	20.24	
11200	47	4195	20.60	
11330	60	4285	20.89	
11500	73	4375	21.19	
succlon $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
11500	73	0	0	0
11535	91	35	0.41	
11625	103	85	0.68	
11800	123	180	1.13	
12005	147	305	1.67	
12140	165	400	2.08	
12405	192	545	2.69	
12550	212	650	3.15	
12835	242	815	3.83	
13050	266	950	4.37	
13340	296	1120	5.05	
13735	337	1355	5.98	
14400	402	1740	7.45	
14850	451	2030	8.56	
15245	490	2265	9.44	
15530	515	2430	10.00	
15900	550	2640	10.80	
20125	572	2785	11.29	
20440	602	2980	11.97	
20730	630	3150	12.61	
21255	681	3475	13.76	
21620	711	3680	14.44	
21915	738	3855	15.05	
22145	760	4005	15.55	
22430	785	4170	16.12	
22655	806	4315	16.59	
22835	821	4415	16.93	
23050	841	4550	17.38	
23325	864	4705	17.90	
23540	884	4840	18.36	
24100	930	5160	19.40	
24355	956	5335	19.99	
24810	990	5590	20.76	
25110	1017	5770	21.37	
25305	1033	5885	21.73	

Tableaux des mesures

Ouro Madiou

Solution 4				
Solution: c = 1 meq/l; SAR = 2				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion $h_0 = 8$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
5500	32	0	0	
5550	62	50	0.68	
5650	115	110	1.88	
5750	175	170	3.24	
5940	271	280	5.41	
10107	328	367	6.70	
10219	367	439	7.58	
10338	402	518	8.37	
10527	442	627	9.28	
10838	497	818	10.53	
11045	530	945	11.27	
11230	555	1050	11.84	
11959	625	1499	13.42	
12328	683	1708	14.74	
12813	730	1993	15.80	
13000	750	2100	16.25	
13415	795	2355	17.27	
13820	841	2600	18.31	
14200	870	2820	18.97	
14610	902	3070	19.69	
15220	949	3440	20.76	
15710	985	3730	21.57	
20835	289	3730	21.57	
21320	312	4015	22.09	
21740	345	4275	22.84	
22200	378	4535	23.59	
23200	448	5135	25.17	
succion $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
23200	448	0	0	
23805	502	365	1.22	
24200	531	600	1.88	
24710	571	910	2.78	
25015	594	1095	3.30	
25510	630	1390	4.12	
30235	685	1835	5.36	
30945	737	2265	6.54	
31515	778	2595	7.47	
32735	870	3335	9.55	
33420	921	3740	10.71	
34200	978	4200	12.00	
34845	1027	4605	13.11	

Solution 5				
Solution: c = 3 meq/l; SAR = 0				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion $h_0 = 8$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	175	0	0	
115	240	75	2.63	
150	262	110	3.53	
250	294	170	4.82	
425	335	265	6.49	
520	356	320	7.34	
630	375	390	8.11	
715	387	435	8.59	
805	400	485	9.12	
915	416	555	9.77	
940	430	900	12.44	
1045	453	1015	13.21	
1500	482	1135	14.07	
1655	501	1245	14.80	
1855	522	1415	15.85	
2045	540	1515	16.46	
2335	566	1600	16.94	
2515	581	1700	17.51	
2640	593	1810	18.20	
2820	607	1900	18.65	
3010	624	1975	19.09	
3140	635	2075	19.66	
3255	646	2075	19.66	
3435	660	2170	20.11	
3700	95	2425	21.32	
3835	106	2510	21.77	
4250	136	2610	22.25	
4415	147	2705	22.70	
4555	159	2780	23.10	
4730	170	2885	23.59	
4845	180	3005	24.16	
5030	192	3135	24.77	
5230	206	3280	25.46	
5440	221	3400	26.02	
5705	238	3595	26.87	
5905	252	3720	27.48	
10220	273	3790	27.81	
10425	288	3970	28.58	
10535	296	4020	28.82	
10835	315			
10925	321			
succion $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
10925	321	0	0	
10955	323	30	0.08	
11055	340	90	0.77	
11215	353	170	1.30	
11310	363	225	1.70	
11430	376	305	2.23	
11605	390	400	2.80	
11740	405	495	3.40	
11925	421	600	4.05	
12035	431	670	4.46	
12305	455	820	5.43	
12525	475	960	6.24	
12805	500	1120	7.26	
13035	523	1270	8.19	
13330	549	1445	9.24	
13725	585	1680	10.70	
14345	644	2060	13.09	
14835	685	2350	14.75	
15235	720	2590	16.17	

Solution 6				
Solution: c = 3 meq/l; SAR = 1				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	18	0	0	
125	46	85	0.63	
250	65	170	1.06	
500	93	300	1.70	
625	112	385	2.13	
1000	156	600	3.12	
1300	189	780	3.87	
1655	231	1015	4.82	
2120	275	1280	5.82	
2535	315	1535	6.72	
2930	349	1770	7.49	
3420	391	2060	8.44	
3945	434	2385	9.42	
4520	477	2720	10.39	
5230	526	3150	11.50	
5740	561	3460	12.29	
10455	605	3895	13.29	
11145	645	4305	14.19	
11810	680	4690	14.98	
12600	720	5160	15.89	
13520	764	5720	16.89	
14335	801	6215	17.72	
15205	839	6725	18.58	
15900	866	7140	19.19	
succion $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
20050	47	0	0	
20210	94	80	1.06	
20730	160	400	2.56	
21220	210	690	3.69	
21600	249	910	4.57	
22145	305	1255	5.84	
22645	354	1555	6.95	
23335	420	1965	8.44	
23830	466	2260	9.48	
24430	521	2620	10.73	
25125	581	3035	12.09	
25915	649	3505	13.63	
30520	717	3870	15.17	

Tableaux des mesures

Ouro Madiou

Solution 7				
Solution: c = 3 meq/l; SAR = 2				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 8$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
21810	46	0	0	
21935	86	85	1.62	
22025	109	135	2.55	
22115	132	185	3.49	
22205	155	235	4.42	
22305	181	295	5.47	
22415	206	365	6.49	
22600	236	470	7.70	
22745	260	575	8.67	
22945	283	695	9.61	
23250	313	880	10.82	
23600	342	1070	12.00	
24140	383	1410	13.66	
24425	405	1575	14.55	
24930	437	1880	15.85	
25230	457	2060	16.66	
25625	481	2295	17.63	
30010	503	2520	18.52	
30305	520	2695	19.21	
30615	537	2885	19.90	
30900	552	3050	20.51	
31240	572	3270	21.32	
31615	590	3485	22.05	
31910	605	3660	22.66	
32105	614	3775	23.02	
32325	626	3915	23.51	
32705	643	4135	24.20	
33020	659	4330	24.84799	
33230	669	4460	25.25	
suction $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
33705	134	0	0	
33910	163	125	1.18	
34020	173	195	1.58	
34300	196	355	2.51	
34510	214	485	3.24	
34905	247	720	4.58	
35030	258	805	5.03	
35435	292	1050	6.40	
35720	313	1215	7.26	
40020	337	1395	8.23	
40310	360	1565	9.16	
40635	386	1770	10.21	
40920	410	1935	11.19	
41205	430	2100	12.00	
41455	451	2270	12.85	
41755	474	2450	13.78	
42045	496	2620	14.67	
42205	506	2700	15.08	
42435	525	2850	15.85	
42850	556	3105	17.11	
43035	569	3210	17.63	
43445	599	3460	18.85	
43755	622	3650	19.78	
44030	641	3805	20.55	
44315	661	3970	21.36	
44710	687	4205	22.42	
44900	700	4315	22.94	

Solution 8				
Solution: c = 3 meq/l; SAR = 5				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	42	0	0	
35	50	35	0.18	
412	106	252	1.45	
635	142	395	2.26	
910	176	550	3.03	
1200	200	720	3.58	
1340	230	820	4.26	
1510	240	910	4.48	
1620	265	980	5.05	
1740	281	1060	5.41	
1850	295	1130	5.73	
1940	305	1180	5.95	
2040	317	1240	6.22	
2215	335	1335	6.63	
2755	395	1675	7.99	
3200	435	1920	8.90	
3545	470	2145	9.69	
3905	500	2345	10.37	
4205	525	2525	10.93	
4550	555	2750	11.61	
4940	585	2980	12.29	
5300	619	3180	13.06	
5530	630	3330	13.31	
5900	655	3540	13.88	
10120	672	3680	14.26	
10400	692	3840	14.71	
10750	718	4070	15.30	
11050	736	4250	15.71	
11325	755	4405	16.14	
11615	772	4575	16.52	
11905	790	4745	16.93	
12255	815	4975	17.50	
12630	836	5190	17.97	
13030	860	5430	18.52	
13440	885	5680	19.08	
14025	917	6025	19.81	
14330	935	6210	20.21277	
suction $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
14550	79	0	0	
14700	132	70	1.20	
14915	188	205	2.47	
15130	233	340	3.49	
15539	305	589	5.12	
15903	367	793	6.52	
20142	441	952	8.19	
20540	478	1190	9.03	
20744	512	1314	9.80	
21047	558	1497	10.84	
21425	610	1715	12.02	
21659	648	1869	12.88	
22000	692	2050	13.88	
22345	744	2275	15.05	
22840	811	2570	16.57	
23255	866	2825	17.81	
23830	940	3160	19.49	
24300	968	3430	20.12	

Solution 9				
Solution: c = 10 meq/l; SAR = 2				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	47	0	0	
110	57	70	0.41	
240	65	160	0.73	
415	73	255	1.05	
315	83	195	1.46	
955	101	595	2.19	
1240	114	760	2.72	
1550	129	950	3.32	
2055	152	1255	4.26	
2530	173	1530	5.11	
2915	190	1755	5.80	
3405	211	2045	6.65	
3920	232	2360	7.50	
4505	255	2705	8.43	
5220	282	3140	9.53	
5725	301	3445	10.30	
10445	326	3885	11.31	
11130	348	4290	12.20	
11745	368	4665	13.01	
12535	392	5135	13.98	
13500	419	5700	15.08	
14310	441	6190	15.97	
15125	463	6685	16.86	
20145	490	7305	17.96	
suction $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
20545	48	0	0	
20625	65	40	0.69	
20755	85	130	1.50	
21155	120	370	2.92	
21545	149	600	4.09	
22120	192	935	5.84	
22630	230	1245	7.38	
23315	278	1650	9.32	
23815	312	1950	10.70	
24420	351	2315	12.28	
25110	395	2725	14.07	
25845	442	3180	15.97	
30655	490	3670	17.92	

Tableaux des mesures

Ouro Madiou

Solution 10			
Solution: c = 10 mg/l; SAR = 5			
Infiltromètre IMD			
Facteur de conversion F = 24.67			
mesures brutes		mesures corrigées	
temps	h brut	temps	h net
suction h ₀ = 14 cm			
hmmss	mm	s	mm
0	62	0	0.00
44	72	44	0.41
420	92	260	1.22
705	122	425	2.43
915	150	555	3.57
1420	204	860	5.76
1610	226	970	6.65
1810	246	1090	7.46
1930	260	1170	8.03
2100	272	1260	8.51
2230	285	1350	9.04
2815	328	1695	10.78
3210	357	1930	11.96
3600	381	2160	12.93
3915	401	2355	13.74
4225	420	2545	14.51
4600	441	2760	15.36
4950	462	2990	16.21
5310	480	3190	16.94
5340	492	3220	17.43
10110	521	3670	18.61
10430	537	3870	19.25
10805	556	4085	20.02
11055	570	4255	20.59
11340	582	4420	21.08
11645	597	4605	21.69
11915	609	4755	22.17
12325	627	5005	22.90
12705	643	5225	23.55
13050	660	5450	24.24
suction h ₀ = 2 cm			
hmmss	mm	s	mm
13345	66	0	0
13420	92	35	1.05
13540	117	115	2.07
13650	133	185	2.72
13945	166	360	4.05
14320	202	575	5.51
14640	235	775	6.85
14855	258	910	7.78
15120	281	1055	8.72
15418	305	1233	9.69
15823	340	1478	11.11
20049	365	1624	12.12
20452	400	1867	13.54
20721	420	2016	14.35
21026	450	2201	15.57
21348	475	2403	16.58
21633	500	2568	17.59
21936	525	2751	18.61
22325	555	2980	19.82
22830	595	3285	21.44
23235	626	3530	22.70
23810	670	3865	24.48
24240	702	4135	25.78

Solution 11			
Solution: c = 10 mg/l; SAR = 10			
Infiltromètre IMD			
Facteur de conversion F = 24.67			
mesures brutes		mesures corrigées	
temps	h brut	temps	h net
suction h ₀ = 14 cm			
hmmss	mm	s	mm
0	35	0	0.00
157	102	117	2.72
255	117	175	3.32
517	145	317	4.46
710	167	430	5.35
818	181	498	5.92
920	190	560	6.28
1510	243	910	8.43
1855	272	1135	9.61
2355	308	1435	11.07
2715	330	1635	11.96
3111	355	1871	12.97
3425	374	2065	13.74
3710	391	2230	14.43
4040	410	2440	15.20
4505	435	2705	16.21
4735	450	2855	16.82
5140	471	3100	17.67
5625	494	3385	18.61
10618	542	3978	20.55
10910	560	4150	21.28
11317	580	4397	22.09
11730	598	4650	22.82
suction h ₀ = 2 cm			
hmmss	mm	s	mm
11938	38	0	0
12033	52	55	0.57
12225	72	167	1.38
12915	135	577	3.93
13608	190	990	6.16
14120	241	1302	8.23
14720	290	1662	10.21
15320	342	2022	12.32
15820	383	2322	13.98
20235	419	2577	15.44
20950	478	3012	17.84
21505	522	3327	19.62
22039	566	3661	21.40
22500	604	3922	22.94
22825	627	4127	23.88
23225	658	4367	25.13
24040	725	4862	27.85

Solution 12			
Solution: c = 10 mg/l; SAR = 20			
Infiltromètre IMF			
Facteur de conversion F = 44.18			
mesures brutes		mesures corrigées	
temps	h brut	temps	h net
suction h ₀ = 14 cm			
hmmss	mm	s	mm
430	40	0	0.00
533	59	63	0.43
655	92	145	1.18
808	117	218	1.74
902	135	272	2.15
1500	224	630	4.16
1840	264	850	5.07
2340	309	1150	6.09
2700	334	1350	6.65
3045	360	1575	7.24
3415	382	1785	7.74
3655	396	1945	8.06
4020	418	2150	8.56
4450	443	2420	9.12
4725	457	2575	9.44
5130	478	2820	9.91
5550	500	3080	10.41
5900	514	3270	10.73
10536	540	3666	11.32
10835	556	3845	11.68
11233	576	4083	12.13
11720	596	4370	12.58
12020	609	4550	12.88
12240	619	4690	13.11
12900	645	5070	13.69
13528	670	5458	14.26
14050	693	5780	14.78
14700	716	6150	15.30
15300	740	6510	15.84
15755	756	6805	16.21
20225	772	7075	16.57
20935	798	7505	17.16
21455	817	7825	17.59
22025	836	8155	18.02
22500	852	8430	18.39
suction h ₀ = 2 cm			
hmmss	mm	s	mm
22715	102	0	0
22803	116	48	0.32
23205	163	290	1.38
24030	249	795	3.33
24700	312	1185	4.75
25230	367	1515	6.00
25710	407	1795	6.90
30025	437	1990	7.58
30425	472	2230	8.37
31030	525	2595	9.57
31450	564	2855	10.46
31725	584	3010	10.91
32040	612	3205	11.54
32450	646	3455	12.31
32845	680	3690	13.08
33410	724	4015	14.08
34000	770	4365	15.12
34245	792	4530	15.62
34630	822	4755	16.30
34930	846	4935	16.84
35555	899	5320	18.04

Tableaux des mesures

Ouro Madiou

Solution 13			
Solution: c = 30 meq/l; SAR = 10			
Infiltromètre IMF			
Facteur de conversion F = 44.18			
mesures brutes		mesures corrigées	
temps	h brut	temps	h net
succion h ₀ = 14 cm			
hmmss	mm	s	mm
25540	49	0	0.00
25620	59	40	0.23
25735	88	115	0.88
30046	156	306	2.42
30503	244	563	4.41
30825	301	765	5.70
31205	354	985	6.90
31545	404	1205	8.04
31915	448	1415	9.03
32400	504	1700	10.30
32735	544	1915	11.20
33055	580	2115	12.02
33405	611	2305	12.72
33800	650	2540	13.60
34200	689	2780	14.49
34535	722	2995	15.23
34830	749	3170	15.84
35115	773	3335	16.39
40015	851	3875	18.15
40550	892	4210	19.08
41305	957	4645	20.55
succion h ₀ = 2 cm			
hmmss	mm	s	mm
41500	47	0	0
41525	92	25	1.02
41555	115	55	1.54
41855	199	235	3.44
42105	250	365	4.59
42335	310	515	5.95
42625	370	685	7.31
42908	430	848	8.67
43115	475	975	9.69
43635	581	1295	12.09
43930	637	1470	13.35
44240	702	1660	14.83
44509	749	1809	15.89
44855	820	2035	17.50
45255	894	2275	19.17
45555	949	2455	20.42
50000	1025	2700	22.14

Solution 14			
Solution: c = 30 meq/l; SAR = 20			
Infiltromètre IMD			
Facteur de conversion F = 24.67			
mesures brutes		mesures corrigées	
temps	h brut	temps	h net
succion h ₀ = 14 cm			
hmmss	mm	s	mm
25400	59	0	0.00
25450	74	50	0.61
25602	92	122	1.34
25720	108	200	1.99
30035	145	395	3.49
30430	185	630	5.11
30815	219	855	6.49
31145	248	1065	7.66
31520	279	1280	8.92
31845	305	1485	9.97
32340	340	1780	11.39
32710	364	1990	12.36
33035	386	2195	13.25
33345	405	2385	14.03
33740	428	2620	14.96
34150	450	2870	15.85
34520	471	3080	16.70
34815	485	3255	17.27
35100	499	3420	17.84
40000	545	3960	19.70
40530	571	4290	20.75
41245	603	4725	22.05
41745	626	5025	22.98
41940	635	5140	23.35
42250	648	5330	23.88
42605	662	5525	24.44
42855	674	5695	24.93
43130	684	5850	25.33
succion h ₀ = 2 cm			
hmmss	mm	s	mm
43610	57	0	0
43720	90	70	1.34
44020	130	250	2.96
44300	156	410	4.01
44527	180	557	4.99
44915	214	785	6.36
45310	251	1020	7.86
45620	278	1210	8.96
50030	315	1460	10.46
50420	348	1690	11.80
50740	375	1890	12.89
51230	416	2180	14.55
51540	442	2370	15.61
51930	472	2600	16.82
52210	494	2760	17.71
52630	527	3020	19.05
53045	568	3275	20.71
53555	618	3585	22.74
54040	658	3870	24.36
54345	683	4055	25.37
54615	704	4205	26.23

Solution 15			
Solution: c = meq/l; SAR = 40			
Infiltromètre IMD			
Facteur de conversion F = 24.67			
mesures brutes		mesures corrigées	
temps	h brut	temps	h net
succion h ₀ = 14 cm			
hmmss	mm	s	mm
1600	50	0	0.00
1710	75	70	1.01
1810	95	130	1.82
1945	120	225	2.84
2220	149	380	4.01
2445	173	525	4.99
2715	193	675	5.80
2950	213	830	6.61
3355	236	1075	7.54
3640	261	1240	8.55
3920	275	1400	9.12
4320	296	1640	9.97
4635	312	1835	10.62
4925	326	2005	11.19
5230	340	2190	11.76
5545	354	2385	12.32
5820	365	2540	12.77
10220	385	2780	13.58
10515	399	2955	14.15
10905	417	3185	14.88
11205	431	3365	15.44
11520	445	3560	16.01
11820	459	3740	16.58
12130	472	3930	17.11
12435	485	4115	17.63
12755	500	4315	18.24
13355	525	4675	19.25
13655	536	4855	19.70
14030	551	5070	20.31
14455	568	5335	21.00
14755	580	5515	21.48
15050	591	5690	21.93
15500	607	5940	22.58
15810	619	6130	23.06
20215	634	6375	23.67
20440	643	6520	24.04
succion h ₀ = 2 cm			
hmmss	mm	s	mm
20715	45	0	0
20805	55	50	0.45
20940	69	145	0.97
21212	89	297	1.78
21815	143	660	3.97
22210	178	895	5.39
22430	197	1035	6.16
23026	245	1391	8.11
23306	265	1551	8.92
23515	283	1680	9.65
23840	312	1885	10.82
24445	359	2250	12.73
24850	390	2495	13.98
25150	404	2675	14.96
25510	440	2875	16.01
25840	465	3085	17.02
30145	488	3270	17.96
30410	507	3415	18.73
30715	530	3600	19.66
31020	552	3785	20.55
31325	574	3970	21.44
31740	605	4225	22.70
32050	627	4415	23.59
32440	654	4645	24.69

Tableaux des mesures

Ouro Madiou

Solution 16				
Solution: c = 100 meq/l; SAR = 20				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction h ₀ = 14 cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	65	0	0.00	
35	93	35	0.63	
110	115	70	1.13	
215	148	135	1.88	
303	170	183	2.38	
415	202	255	3.10	
505	222	305	3.55	
610	246	370	4.10	
700	265	420	4.53	
815	289	495	5.07	
1040	336	640	6.13	
1230	370	750	6.90	
1400	396	840	7.49	
1730	454	1050	8.80	
1830	482	1170	9.44	
2205	520	1325	10.30	
2435	552	1475	11.02	
2700	585	1620	11.77	
2935	615	1775	12.45	
3240	652	1960	13.29	
3625	692	2185	14.19	
3910	722	2350	14.87	
4310	762	2590	15.78	
4620	795	2780	16.52	
4910	822	2950	17.13	
5215	851	3135	17.79	
5500	878	3300	18.40	
5805	907	3485	19.06	
10205	943	3725	19.87	
10505	970	3905	20.48	
10915	1007	4155	21.32	
suction h ₀ = 2 cm				
hmmss	mm	s	mm	
11125	42	0	0	
11215	79	50	0.84	
11350	112	145	1.58	
11505	136	220	2.13	
11808	190	403	3.35	
12110	241	585	4.50	
12425	296	780	5.75	
12745	356	980	7.11	
13040	405	1155	8.22	
13340	455	1335	9.35	
13645	505	1520	10.48	
14020	560	1735	11.72	
14435	627	1990	13.24	
14740	674	2175	14.31	
15035	716	2350	15.26	
15440	774	2595	16.57	
15745	820	2780	17.61	
20205	882	3040	19.01	
20733	961	3368	20.80	
20925	991	3480	21.48	

Solution 17				
Solution: c = 100 meq/l; SAR = 40				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction h ₀ = 14 cm				
hmmss	mm	s	mm	
35879	45	0	0.00	
40000	67	41	0.89	
40239	105	200	2.43	
40350	120	271	3.04	
40538	130	379	3.45	
40756	150	517	4.26	
41022	165	663	4.86	
41320	180	841	5.47	
41653	200	1054	6.28	
41919	210	1200	6.69	
42252	225	1413	7.30	
42545	240	1586	7.90	
42752	245	1713	8.11	
43109	255	1910	8.51	
43327	260	2048	8.72	
43400	282	2081	9.61	
43619	291	2220	9.97	
43840	300	2361	10.34	
44324	303	2645	10.46	
44826	311	2947	10.78	
45306	320	3227	11.15	
45620	325	3421	11.35	
suction h ₀ = 2 cm				
hmmss	mm	s	mm	
55310	45	0	0	
55425	107	75	2.51	
55930	155	380	4.46	
60245	180	575	5.47	
60605	205	775	6.49	
61000	233	1010	7.62	
61325	257	1215	8.59	
61600	276	1370	9.36	
62010	305	1620	10.54	
62320	327	1810	11.43	
62930	368	2180	13.09	
63220	387	2350	13.86	
63600	413	2570	14.92	
64000	440	2810	16.01	
64350	465	3040	17.02	
64640	484	3210	17.99	
65435	535	3685	19.86	
65735	555	3865	20.67	
70035	574	4045	21.44	
70315	591	4205	22.13	

Solution 18				
Solution: c = 100 meq/l; SAR = 80				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction h ₀ = 14 cm				
hmmss	mm	s	mm	
23640	38	0	0.00	
23711	95	31	1.29	
23825	141	105	2.33	
23935	181	175	3.24	
24435	270	475	5.25	
24840	320	720	6.38	
25140	354	900	7.15	
25500	397	1100	7.90	
25815	418	1295	8.60	
30135	446	1495	9.23	
30425	470	1665	9.78	
30705	492	1825	10.28	
31005	515	2005	10.80	
31315	539	2195	11.34	
31725	570	2445	12.04	
32040	595	2640	12.61	
32420	621	2860	13.20	
32725	642	3045	13.67	
33017	661	3217	14.10	
33529	695	3529	14.87	
33847	719	3727	15.41	
34153	737	3913	15.82	
34438	755	4078	16.23	
34842	780	4322	16.79	
35040	795	4440	17.13	
35400	810	4640	17.47	
35756	839	4876	18.13	
40130	863	5090	18.67	
40325	875	5205	18.95	
40559	890	5359	19.28	
40843	906	5523	19.65	
41114	920	5674	19.96	
41346	935	5826	20.30	
41715	960	6035	20.87	
41945	973	6185	21.16	
42119	985	6279	21.44	
42320	995	6400	21.66	
42415	1000	6455	21.77	
suction h ₀ = 2 cm				
hmmss	mm	s	mm	
42820	11	0	0	
43027	55	127	1.00	
43436	101	376	2.04	
43644	150	696	3.37	
43956	160	1321	6.32	
44359	250	2110	8.90	
44630	300	2575	10.66	
45021	290	2874	11.75	
45339	350	3245	13.11	
45654	350	3505	14.06	
45903	360	3704	14.69	
50330	404	3925	15.48	
51115	482	4103	16.18	
51614	530	4335	16.98	
52225	590	5100	19.67	
52645	632	5488	21.05	
53004	660	5670	21.71	
53345	695	5875	22.41	
53643	726			
54035	761			
55320	880			
55948	941			
60250	970			
60615	1001			

Tableaux des mesures

Ngaoulé

Solution 1				
Solution: eau distillée				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 8 \text{ cm}$				
hmmss	mm	s	mm	
-40	42	0	0	0
25	50	65	0.32	
145	55	145	0.53	
405	64	285	0.89	
755	76	515	1.38	
1105	97	705	2.23	
1240	122	800	3.24	
1510	150	950	4.38	
1810	174	1130	5.35	
2130	194	1330	6.16	
2500	211	1540	6.85	
2930	230	1810	7.62	
3325	243	2045	8.15	
3900	260	2380	8.84	
4340	274	2660	9.40	
4710	283	2870	9.77	
5130	293	3130	10.17	
5540	302	3380	10.54	
10005	312	3645	10.94	
10415	320	3895	11.27	
10840	329	4160	11.63	
11410	339	4490	12.04	
11915	348	4795	12.40	
12605	360	5205	12.89	
13215	370	5575	13.30	
13905	380	5985	13.70	
14500	389	6340	14.07	
15115	398	6715	14.43	
15610	405	7010	14.71	
20200	414	7360	15.08	
21040	425	7880	15.52	
21625	432	8225	15.81	
22240	439	8600	16.09	
22810	446	8930	16.38	
23500	454	9340	16.70	
24230	462	9790	17.02	
24810	469	10130	17.31	
25510	477	10550	17.63	
30305	485	11025	17.96	
31010	493	11450	18.28	
31655	500	11855	18.57	
32330	506	12250	18.81	
suction $h_0 = 2 \text{ cm}$				
hmmss	mm	s	mm	
34720	77	0	0.00	
35010	111	170	1.38	
35350	125	390	1.95	
35725	136	605	2.39	
40115	143	835	2.68	
40530	161	1090	3.40	
40925	173	1325	3.89	
41350	186	1590	4.42	
41805	197	1845	4.86	
42330	211	2170	5.43	
42735	222	2415	5.88	
43220	234	2700	6.36	
43525	242	2885	6.69	
43935	252	3135	7.09	
44325	261	3365	7.46	
44800	271	3640	7.86	
45215	281	3895	8.27	
45950	298	4350	8.96	
50635	312	4755	9.53	
51025	320	4985	9.85	
51450	328	5250	10.17	
51850	336	5490	10.50	
52510	348	5870	10.99	
53130	360	6250	11.47	
53640	370	6560	11.88	
54225	380	6905	12.28	
54645	387	7165	12.57	

Solution 2				
Solution: c = 1 meq/l; SAR = 0				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 8 \text{ cm}$				
hmmss	mm	s	mm	
0	22	0	0	0
115	110	75	1.99	
205	141	125	2.69	
325	175	205	3.46	
455	200	295	4.03	
635	220	395	4.48	
945	241	585	4.96	
1245	282	765	5.89	
1630	388	990	8.28	
2100	114	990	8.28	
2300	133	1110	8.71	
2445	147	1215	9.03	
2635	155	1325	9.21	
3100	167	1590	9.48	
3425	176	1795	9.69	
4305	210	2315	11.95	
5120	256	2810	12.99	
5610	281	3100	13.56	
10020	302	3350	14.03	
10515	327	3645	14.60	
11105	355	3995	15.23	
11605	377	4295	15.73	
12120	403	4610	16.32	
12745	432	4995	16.98	
13315	456	5325	17.52	
13810	478	5620	18.02	
14215	495	5865	18.40	
14735	517	6185	18.90	
15405	545	6575	19.53	
15945	567	6915	20.03	
20630	595	7320	20.67	
21300	619	7710	21.21	
21910	642	8080	21.73	
22735	673	8585	22.43	
23240	690	8890	22.82	
23835	711	9245	23.29	
24500	734	9630	23.81	
25055	752	9985	24.22	
25705	773	10355	24.69	
30245	791	10695	25.10	
30710	805	10960	25.42	
suction $h_0 = 2 \text{ cm}$				
hmmss	mm	s	mm	
31050	31	0	0.00	
31145	54	55	0.52	
31435	80	225	1.11	
31845	112	475	1.83	
32405	151	795	2.72	
33100	200	1210	3.83	
33630	240	1540	4.73	
34330	287	1960	5.79	
34710	314	2180	6.41	
35140	344	2450	7.08	
35750	385	2820	8.01	
40515	434	3265	9.12	
41140	474	3650	10.03	
41845	518	4075	11.02	
42425	553	4415	11.82	
43025	590	4775	12.65	
43710	631	5180	13.58	
44225	662	5495	14.28	
44835	697	5865	15.07	
45530	739	6280	16.03	
50210	777	6680	16.89	
51105	826	7215	17.99	

Solution 3				
Solution: c = 1 meq/l; SAR = 1				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 8 \text{ cm}$				
hmmss	mm	s	mm	
0	32	0	0	0
105	52	65	0.81	
405	120	245	3.57	
530	141	330	4.42	
645	157	405	5.07	
815	174	495	5.76	
1115	199	675	6.77	
1345	217	825	7.50	
1600	230	960	8.03	
1915	246	1155	8.67	
2225	260	1345	9.24	
2525	273	1525	9.77	
2820	284	1700	10.21	
3125	295	1885	10.66	
3415	305	2055	11.07	
3840	318	2320	11.59	
4250	332	2570	12.16	
4700	344	2820	12.65	
5135	358	3095	13.21	
5505	367	3305	13.58	
10035	382	3635	14.13	
10450	392	3890	14.59	
10825	401	4105	14.96	
11250	412	4370	15.40	
11815	425	4695	15.93	
12125	432	4885	16.21	
12830	449	5310	16.90	
13640	467	5800	17.63	
14150	478	6110	18.08	
14525	486	6325	18.40	
15005	496	6605	18.81	
20310	524	7390	19.94	
20640	530	7600	20.19	
21130	540	7890	20.59	
21900	555	8340	21.20	
22335	564	8615	21.56	
23030	577	9030	22.09	
23655	588	9415	22.54	
24125	597	9685	22.90	
24645	606	10005	23.27	
25345	619	10425	23.79	
suction $h_0 = 2 \text{ cm}$				
hmmss	mm	s	mm	
0	46	0	0.00	
41	70	41	0.97	
230	84	150	1.54	
520	97	320	2.07	
735	105	455	2.39	
1025	115	625	2.80	
1250	123	770	3.12	
1525	132	925	3.49	
1825	142	1105	3.89	
2500	164	1500	4.78	
3120	183	1880	5.55	
3510	195	2110	6.04	
3830	206	2310	6.49	
4230	218	2550	6.97	
4545	228	2745	7.38	
5005	241	3005	7.90	
5510	256	3310	8.51	
5915	268	3555	9.00	
10305	280	3785	9.49	
10850	296	4130	10.13	
11200	305	4320	10.50	
11630	317	4590	10.99	
12000	327	4800	11.39	
12345	337	5025	11.80	
12725	347	5245	12.20	
13110	358	5470	12.65	
13535	370	5735	13.13	
13955	381	5995	13.58	
14550	397	6350	14.23	
14855	405	6535	14.55	
15300	416	6780	15.00	
15710	426	7030	15.40	

Tableaux des mesures

Ngaoulé

Solution 4				
Solution: c = 1 meq/l; SAR = 2				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion $h_0 = 8$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
34500	13	0	0	
34650	183	110	3.85	
35025	281	325	6.07	
35455	355	595	7.74	
35900	411	840	9.01	
40355	466	1135	10.25	
40810	510	1390	11.25	
41245	550	1665	12.15	
41810	596	1990	13.20	
42235	630	2255	13.97	
42715	665	2535	14.76	
43140	695	2800	15.44	
43510	720	3010	16.00	
44640	793	3700	17.66	
45035	817	3935	18.20	
45420	839	4160	18.70	
50240	886	4660	19.76	
50610	904	4870	20.17	
51025	928	5125	20.71	
51700	962	5520	21.48	
52130	985	5790	22.00	
52535	1005	6035	22.45	
succion $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
52925	21	0	0.00	
53040	44	75	0.52	
53405	84	280	1.43	
53820	130	535	2.47	
54235	175	790	3.49	
54615	213	1010	4.35	
55300	280	1415	5.86	
55705	320	1660	6.77	
60305	378	2020	8.08	
60725	418	2280	8.99	
61155	460	2550	9.94	
61705	508	2860	11.02	
62225	555	3180	12.09	
62650	593	3445	12.95	
63145	635	3740	13.90	
63650	678	4045	14.87	
64330	731	4445	16.07	
64825	770	4740	16.95	
65245	804	5000	17.72	
65655	836	5250	18.45	
70040	864	5475	19.08	
70415	891	5690	19.69	
70820	922	5935	20.39	
71300	955	6215	21.14	

Solution 5				
Solution: c = 3 meq/l; SAR = 0				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion $h_0 = 8$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
2405	54	0	0	
2800	82	235	1.13	
3110	98	425	1.78	
3500	114	655	2.43	
3725	123	800	2.80	
4140	138	1055	3.40	
4550	151	1305	3.93	
5005	164	1560	4.46	
5550	179	1905	5.07	
10340	199	2375	5.88	
10900	212	2695	6.40	
11335	222	2970	6.81	
11905	235	3300	7.34	
12415	245	3610	7.74	
12845	255	3880	8.15	
13355	265	4190	8.55	
13930	276	4525	9.00	
14620	284	4935	9.32	
15420	304	5415	10.13	
20035	310	5790	10.38	
20850	330	6285	11.19	
21530	341	6685	11.63	
22115	351	7030	12.04	
22925	364	7520	12.57	
23415	372	7810	12.89	
24045	383	8200	13.34	
24530	389	8485	13.58	
25235	400	8910	14.03	
25810	409	9245	14.39	
30650	421	9765	14.88	
31320	430	10155	15.24	
31950	439	10545	15.61	
32835	451	11070	16.09	
33500	460	11455	16.46	
succion $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
33910	35	0	0.00	
34015	50	65	0.61	
34300	64	230	1.18	
34805	85	535	2.03	
35345	107	875	2.92	
35820	124	1150	3.61	
40330	143	1460	4.38	
40855	163	1785	5.19	
41400	181	2090	5.92	
42010	203	2460	6.81	
42520	220	2770	7.50	
43315	247	3245	8.59	
44100	273	3710	9.65	
44810	296	4140	10.58	
45400	313	4490	11.27	
50245	339	5015	12.32	
50820	354	5350	12.93	
51355	369	5685	13.54	
52245	393	6215	14.51	
52630	402	6440	14.88	
53005	411	6655	15.24	

Solution 6				
Solution: c = 3 meq/l; SAR = 1				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
24340	25	0	0	
24535	68	115	1.74	
24725	96	225	2.88	
25010	122	390	3.93	
25410	150	630	5.07	
30215	189	1115	6.65	
30850	213	1510	7.62	
31255	227	1755	8.19	
31815	245	2075	8.92	
32245	259	2345	9.49	
32700	271	2600	9.97	
33110	282	2850	10.42	
33535	293	3115	10.86	
33935	304	3355	11.31	
34345	314	3605	11.71	
34745	323	3845	12.08	
35200	333	4100	12.48	
35615	343	4355	12.89	
40035	353	4615	13.30	
40525	364	4905	13.74	
40925	373	5145	14.11	
41420	384	5440	14.55	
42110	398	5850	15.12	
42635	409	6175	15.57	
43225	421	6525	16.05	
43740	433	6840	16.54	
44335	440	7195	16.82	
succion $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
45420	29	0	0.00	
45525	50	65	0.85	
50245	82	505	2.15	
50910	119	890	3.65	
51425	143	1205	4.62	
51835	162	1455	5.39	
52255	182	1715	6.20	
52730	202	1990	7.01	
53205	222	2265	7.82	
53655	242	2555	8.63	
54235	266	2895	9.61	
54835	292	3255	10.66	
55430	317	3610	11.67	
60115	344	4015	12.77	
60640	365	4340	13.62	
61343	393	4763	14.75	
61820	412	5040	15.52	
62525	437	5465	16.54	
63145	460	5845	17.47	
63735	481	6195	18.32	
64530	508	6670	19.42	
65200	530	7060	20.31	
65840	551	7460	21.16	

Tableaux des mesures

Ngaoulé

Solution 7				
Solution: c = 3 meq/l; SAR = 2				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 8$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	30	0	0	
100	124	60	2.13	
215	172	135	3.21	
400	221	240	4.32	
600	261	360	5.23	
820	300	500	6.11	
1050	332	650	6.84	
1535	388	935	8.10	
2000	433	1200	9.12	
2440	475	1480	10.07	
2840	510	1720	10.86	
3205	535	1925	11.43	
3620	567	2180	12.15	
4015	596	2415	12.81	
4655	641	2815	13.83	
5120	670	3080	14.49	
5600	700	3360	15.17	
10110	731	3670	15.87	
10550	758	3950	16.48	
11000	782	4200	17.02	
11440	807	4480	17.59	
11930	834	4770	18.20	
12330	855	5010	18.67	
12835	880	5315	19.24	
13245	902	5565	19.74	
13755	927	5875	20.30	
suction $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
14240	28	0	0.00	
14410	58	90	0.68	
14545	76	185	1.09	
14810	100	330	1.63	
15355	152	675	2.81	
15830	195	950	3.78	
20230	231	1190	4.59	
20740	276	1500	5.61	
21145	312	1745	6.43	
21555	349	1995	7.27	
22000	385	2240	8.08	
22430	423	2510	8.94	
22920	464	2800	9.87	
23340	501	3060	10.71	
23750	535	3310	11.48	
24400	588	3680	12.68	
24855	625	3975	13.51	
25850	710	4570	15.44	
30345	751	4865	16.36	
30835	789	5155	17.22	
31610	850	5610	18.61	
32120	892	5920	19.56	
32540	926	6180	20.33	
33040	967	6480	21.25	
33515	1003	6755	22.07	

Solution 8				
Solution: c = 3 meq/l; SAR = 5				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	21	0	0	
100	84	60	1.43	
210	120	130	2.24	
330	151	210	2.94	
455	177	295	3.53	
715	213	435	4.35	
1020	253	620	5.25	
1410	293	850	6.16	
1710	321	1030	6.79	
2000	345	1200	7.33	
2615	392	1575	8.40	
2950	416	1790	8.94	
3245	436	1965	9.39	
3635	461	2195	9.96	
3930	479	2370	10.37	
4300	500	2580	10.84	
4825	529	2905	11.50	
5155	549	3115	11.95	
5530	567	3330	12.36	
5900	586	3540	12.79	
10320	608	3800	13.29	
10905	636	4145	13.92	
11350	660	4430	14.46	
11805	680	4685	14.92	
12230	700	4950	15.37	
12750	725	5270	15.93	
13210	745	5530	16.39	
13545	760	5745	16.73	
13955	779	5995	17.16	
14540	803	6340	17.70	
14945	820	6585	18.09	
15535	844	6935	18.63	
20130	869	7290	19.19	
20805	896	7685	19.81	
21330	917	8010	20.28	
22125	948	8485	20.98	
22800	975	8880	21.59	
23205	991	9125	21.96	
suction $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
23330	40	0	0.00	
23800	105	270	1.47	
24000	128	390	1.99	
24550	190	740	3.40	
25430	280	1260	5.43	
25915	328	1545	6.52	
30325	372	1795	7.51	
30900	427	2130	8.76	
31455	486	2485	10.10	
32020	540	2810	11.32	
32615	604	3165	12.77	
33055	648	3445	13.76	
33435	683	3665	14.55	
34230	756	4140	16.21	
35015	826	4605	17.79	
35645	885	4995	19.13	
40305	944	5375	20.46	
40950	1005	5780	21.84	

Solution 9				
Solution: c = 10 meq/l; SAR = 2				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
44750	21	0	0	
44850	70	60	1.99	
45105	123	195	4.13	
45325	155	335	5.43	
45435	167	405	5.92	
45700	191	550	6.89	
50255	233	905	8.59	
50620	255	1110	9.49	
51050	280	1380	10.50	
51725	311	1775	11.76	
52150	330	2040	12.53	
52550	346	2280	13.17	
53005	363	2535	13.86	
53415	378	2785	14.47	
53850	394	3060	15.12	
54300	407	3310	15.65	
54640	419	3530	16.13	
55315	439	3925	16.94	
55715	450	4165	17.39	
60325	467	4535	18.08	
60755	480	4605	18.61	
61210	491	5060	19.05	
61725	505	5375	19.62	
62330	520	5740	20.23	
62710	530	5960	20.63	
63200	541	6250	21.08	
63745	555	6595	21.65	
64405	568	6975	22.17	
64850	579	7260	22.62	
suction $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
65050	37	0	0.00	
65130	50	40	0.53	
65305	61	135	0.97	
65715	83	385	1.86	
70140	105	650	2.76	
70430	117	820	3.24	
70840	137	1070	4.05	
71315	158	1345	4.90	
71840	184	1670	5.96	
72210	200	1880	6.61	
72610	218	2120	7.34	
73030	237	2380	8.11	
73425	254	2615	8.80	
74105	282	3015	9.93	
74635	305	3345	10.86	
75040	321	3590	11.51	
75450	338	3840	12.20	
75850	354	4080	12.85	
80305	371	4335	13.54	
80920	395	4710	14.51	
81350	412	4980	15.20	
81750	426	5220	15.77	
82155	442	5465	16.42	

Tableaux des mesures

Ngaoulé

Solution 10				
Solution: c = 10 meq/l; SAR = 5				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
43800	42	0	0.00	
43850	75	50	1.34	
43945	101	105	2.39	
44130	134	210	3.73	
44435	172	395	5.27	
44800	202	600	6.49	
45210	232	850	7.70	
45520	252	1040	8.51	
45850	272	1250	9.32	
50135	286	1415	9.89	
50545	306	1665	10.70	
50925	323	1885	11.39	
51330	340	2130	12.08	
51800	357	2400	12.77	
52230	375	2670	13.50	
52715	392	2955	14.19	
53210	409	3250	14.88	
53625	423	3505	15.44	
54115	438	3795	16.05	
54655	455	4135	16.74	
55110	467	4390	17.23	
55435	477	4595	17.63	
55915	490	4875	18.16	
60500	505	5220	18.77	
61125	521	5605	19.42	
61830	538	6030	20.11	
62445	553	6405	20.71	
63000	565	6720	21.20	
63540	577	7060	21.69	
64430	596	7590	22.46	
64810	604	7810	22.78	
65300	614	8100	23.19	
65510	619	8230	23.39	
70020	630	8540	23.83	
succion $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
70325	47	0	0.00	
70525	70	120	0.93	
70810	85	285	1.54	
71155	103	510	2.27	
71600	122	755	3.04	
72045	144	1040	3.93	
72515	164	1310	4.74	
73025	186	1620	5.63	
73605	210	1960	6.61	
74041	230	2236	7.42	
74545	251	2540	8.27	
75020	270	2815	9.04	
75605	292	3160	9.93	
80040	310	3435	10.66	
80635	332	3790	11.55	
81010	346	4005	12.12	
82110	387	4665	13.78	
82725	410	5040	14.71	
83305	431	5380	15.57	

Solution 11				
Solution: c = 10 meq/l; SAR = 10				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	45	0	0.00	
50	120	50	1.70	
155	162	115	2.65	
500	233	300	4.26	
715	265	435	4.98	
935	283	575	5.39	
1335	317	815	6.16	
1730	355	1050	7.02	
2310	407	1390	8.19	
2745	446	1665	9.08	
3100	471	1860	9.64	
3440	500	2080	10.30	
3715	516	2235	10.66	
4125	546	2485	11.34	
4600	576	2760	12.02	
5025	604	3025	12.65	
5600	640	3360	13.47	
10400	688	3840	14.55	
10945	722	4185	15.32	
11440	748	4480	15.91	
11930	775	4770	16.52	
12425	798	5065	17.04	
12920	825	5360	17.66	
13415	850	5655	18.22	
13945	878	5985	18.85	
14630	910	6390	19.58	
15430	950	6870	20.48	
20050	980	7250	21.16	
20910	1019	7750	22.05	
succion $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
21130	26	0	0.00	
21240	56	70	0.68	
21520	93	230	1.52	
22130	167	600	3.19	
22935	266	1085	5.43	
23425	324	1375	6.75	
24055	402	1765	8.51	
24540	457	2050	9.76	
25245	540	2475	11.63	
25825	605	2815	13.11	
30700	702	3330	15.30	
31330	775	3720	16.95	
32005	848	4115	18.61	
32855	945	4645	20.80	
33510	1014	5020	22.36	

Solution 12				
Solution: c = 10 meq/l; SAR = 20				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
pas de mesures				

Tableaux des mesures

Ngaoulé

Solution 13				
Solution: c = 30 meq/l; SAR = 10				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion h ₀ = 14 cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	25	0	0.00	
115	50	75	1.01	
225	65	145	1.62	
410	83	250	2.35	
615	101	375	3.08	
840	120	520	3.85	
1100	140	660	4.66	
1545	171	945	5.92	
2010	194	1210	6.85	
2515	217	1515	7.78	
2855	232	1735	8.39	
3220	246	1940	8.96	
3630	261	2190	9.57	
4025	276	2425	10.17	
4705	298	2825	11.07	
5135	312	3095	11.63	
5610	326	3370	12.20	
10120	341	3680	12.81	
10605	354	3965	13.34	
11010	365	4210	13.78	
11450	377	4490	14.27	
11940	390	4780	14.80	
12340	400	5020	15.20	
12850	413	5330	15.73	
13305	423	5585	16.13	
13810	435	5890	16.62	
14320	446	6200	17.07	
14835	458	6515	17.55	
15500	474	6900	18.20	
15850	482	7130	18.52	
20240	491	7360	18.89	
20755	502	7675	19.34	
21620	520	8180	20.06	
22020	529	8420	20.43	
22455	538	8695	20.79	
22930	548	8970	21.20	
23350	556	9230	21.52	
succion h ₀ = 2 cm				
hmmss	mm	s	mm	
23705	35	0	0.00	
23815	50	70	0.61	
24415	86	430	2.07	
24920	113	735	3.16	
25900	161	1315	5.11	
30400	186	1615	6.12	
30900	211	1915	7.13	
31620	245	2355	8.51	
32130	270	2665	9.53	
32550	290	2925	10.34	
33055	313	3230	11.27	
33530	334	3505	12.12	
34530	377	4105	13.86	
35035	400	4410	14.80	
35510	419	4685	15.57	
35915	436	4930	16.25	
40410	456	5225	17.07	
40825	474	5480	17.79	
41310	483	5765	18.57	
42005	521	6180	19.70	
42730	551	6625	20.92	
43205	568	6900	21.61	
43525	581	7100	22.13	

Solution 14				
Solution: c = 30 meq/l; SAR = 20				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion h ₀ = 14 cm				
hmmss	mm	s	mm	
515	22	0	0.00	
545	55	30	0.75	
630	80	75	1.31	
755	111	160	2.01	
1105	165	350	3.24	
1332	198	497	3.98	
1545	224	630	4.57	
1910	256	835	5.30	
2210	281	1015	5.86	
2515	304	1200	6.38	
2805	322	1370	6.79	
3120	342	1565	7.24	
3355	357	1720	7.58	
3840	386	2005	8.24	
4240	407	2245	8.71	
4640	422	2485	9.05	
5125	450	2770	9.69	
5450	467	2975	10.07	
10020	492	3305	10.64	
10440	510	3565	11.05	
10805	525	3770	11.39	
11235	544	4040	11.82	
11805	566	4370	12.31	
12115	580	4560	12.63	
12820	608	4985	13.26	
13600	638	5445	13.94	
14130	660	5775	14.44	
14505	675	5990	14.78	
14955	691	6280	15.14	
15705	716	6710	15.71	
20250	738	7055	16.21	
20630	751	7275	16.50	
21115	768	7560	16.89	
21840	794	8005	17.47	
22325	810	8290	17.84	
23015	834	8700	18.38	
23620	854	9065	18.83	
24110	870	9355	19.19	
24635	888	9680	19.60	
25225	907	10030	20.03	
succion h ₀ = 2 cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	29	0	0.00	
36	66	36	0.84	
215	89	135	1.36	
510	118	310	2.01	
710	135	430	2.40	
955	158	595	2.92	
1235	180	755	3.42	
1510	200	910	3.87	
1815	225	1095	4.44	
2440	276	1480	5.59	
3050	324	1850	6.68	
3455	355	2095	7.38	
3805	380	2285	7.94	
4220	411	2540	8.65	
4530	435	2730	9.19	
4935	465	2975	9.87	
5455	525	3295	11.23	
5905	560	3545	12.02	
10255	593	3775	12.77	
10825	638	4105	13.78	
11220	670	4340	14.51	
11615	701	4575	15.21	
11945	729	4785	15.84	
12310	755	4990	16.43	
12715	786	5235	17.13	
13055	815	5455	17.79	
13525	850	5725	18.58	
13945	882	5985	19.31	
14530	925	6330	20.28	
14845	950	6525	20.85	
15245	980	6765	21.53	
15630	1007	6990	22.14	

Solution 15				
Solution: c = meq/l; SAR = 40				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
succion h ₀ = 14 cm				
hmmss	mm	s	mm	
42245	36	0	0.00	
42445	212	120	3.98	
42545	243	180	4.69	
42710	275	265	5.41	
43155	350	550	7.11	
43505	386	740	7.92	
43905	425	980	8.80	
44310	460	1225	9.60	
44745	490	1500	10.28	
45155	525	1750	11.07	
45925	578	2200	12.27	
50620	622	2615	13.26	
51015	645	2850	13.78	
51430	671	3105	14.37	
51835	695	3350	14.92	
52450	730	3725	15.71	
53105	763	4100	16.46	
53630	792	4425	17.11	
54200	820	4755	17.75	
54635	843	5030	18.27	
55500	885	5535	19.22	
55910	906	5785	19.69	
60620	940	6215	20.46	
61030	960	6465	20.91	
succion h ₀ = 2 cm				
hmmss	mm	s	mm	
61405	25	0	0.00	
61615	60	130	0.79	
61845	85	280	1.36	
62320	130	555	2.38	
62755	175	830	3.40	
63230	218	1105	4.37	
63735	265	1410	5.43	
64150	304	1665	6.32	
64620	345	1935	7.24	
65110	388	2225	8.22	
65840	453	2675	9.69	
70210	482	2885	10.34	
70820	534	3255	11.52	
71355	581	3590	12.58	
71755	614	3830	13.33	
72425	666	4220	14.51	
73120	721	4635	15.75	
73525	755	4880	16.52	
74035	795	5190	17.43	
74430	826	5425	18.13	
74850	860	5685	18.90	
75310	893	5945	19.65	
75720	926	6195	20.39	
80440	982	6635	21.66	
80815	1010	6850	22.30	

Tableaux des mesures

Ngaoulé

Solution 16				
Solution: c = 100 meq/l; SAR = 20				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
42250	32	0	0.00	
42340	101	50	1.56	
42510	165	140	3.01	
42800	235	310	4.59	
43115	290	505	5.84	
43335	321	645	6.54	
43925	382	995	7.92	
44105	396	1095	8.24	
44445	426	1315	8.92	
44815	451	1525	9.48	
45225	480	1775	10.14	
45500	496	1930	10.50	
45820	515	2130	10.93	
50150	535	2340	11.39	
50555	557	2585	11.88	
50915	574	2785	12.27	
51340	596	3050	12.77	
51815	618	3325	13.26	
52255	640	3605	13.76	
52725	660	3875	14.21	
53215	680	4165	14.67	
53635	699	4425	15.10	
54135	719	4725	15.55	
54610	740	5000	16.03	
55120	756	5310	16.39	
55445	770	5515	16.70	
55925	786	5795	17.07	
60520	808	6150	17.56	
61145	831	6535	18.09	
61845	855	6955	18.63	
62455	876	7325	19.10	
63020	894	7650	19.51	
63555	912	7985	19.92	
64440	941	8510	20.57	
suction $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
64730	21	0	0.00	
65245	66	315	1.02	
65450	82	440	1.38	
70010	122	760	2.29	
70345	151	975	2.94	
70540	166	1090	3.28	
70820	188	1250	3.78	
71215	219	1485	4.48	
71610	250	1720	5.18	
72055	289	2005	6.07	
72525	323	2275	6.84	
73035	363	2585	7.74	
73518	400	2868	8.58	
74115	443	3225	9.55	
74605	481	3515	10.41	
75035	514	3785	11.16	
75615	556	4125	12.11	
80100	590	4410	12.88	
80650	632	4760	13.83	
81020	657	4970	14.40	
82125	734	5635	16.14	
82735	778	6005	17.13	
83315	816	6345	17.99	

Solution 17				
Solution: c = 100 meq/l; SAR = 40				
Infiltromètre IMF				
Facteur de conversion F = 44.18				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
-40	31	0	0.00	
35	100	75	1.56	
200	140	160	2.47	
415	183	295	3.44	
805	235	525	4.62	
1140	273	740	5.48	
1255	285	815	5.75	
1530	309	970	6.29	
1820	332	1140	6.81	
2135	357	1335	7.38	
2510	383	1550	7.97	
2940	413	1820	8.65	
3340	439	2060	9.23	
3915	473	2395	10.00	
4350	500	2670	10.62	
4720	518	2880	11.02	
5140	541	3140	11.54	
5550	563	3390	12.04	
10025	587	3665	12.58	
10435	608	3915	13.06	
10855	629	4175	13.54	
11415	654	4495	14.10	
11920	677	4800	14.62	
12615	709	5215	15.35	
13225	737	5585	15.98	
13920	767	6000	16.66	
14520	793	6360	17.25	
15135	820	6735	17.86	
15630	841	7030	18.33	
20215	865	7375	18.88	
21050	900	7890	19.67	
21645	924	8245	20.21	
22300	948	8620	20.76	
22845	972	8965	21.30	
23520	998	9360	21.89	
suction $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
23705	30	0	0.00	
23805	48	60	0.41	
24235	95	330	1.47	
24820	152	675	2.76	
25525	219	1100	4.28	
30315	293	1570	5.95	
31020	359	1995	7.45	
31425	397	2240	8.31	
31705	422	2400	8.87	
32105	461	2640	9.76	
32520	500	2895	10.64	
32930	538	3145	11.50	
33340	577	3395	12.38	
33735	614	3630	13.22	
34150	653	3885	14.10	
34740	707	4235	15.32	
35040	732	4415	15.89	
35405	760	4620	16.52	
35740	791	4835	17.22	
40135	824	5070	17.97	
40540	860	5315	18.79	
40935	894	5550	19.56	
41415	935	5830	20.48	
41815	970	6070	21.28	

Solution 18				
Solution: c = 100 meq/l; SAR = 80				
Infiltromètre IMD				
Facteur de conversion F = 24.67				
mesures brutes		mesures corrigées		
temps	h brut	temps	h net	
suction $h_0 = 14$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
0	25	0	0.00	
155	55	115	1.22	
335	69	215	1.78	
510	80	310	2.23	
645	90	405	2.63	
955	108	595	3.36	
1255	123	775	3.97	
1645	140	1005	4.66	
2130	158	1290	5.39	
2330	166	1410	5.72	
2650	177	1610	6.16	
3110	191	1870	6.73	
3445	201	2085	7.13	
4340	227	2620	8.19	
5135	249	3095	9.08	
5630	261	3390	9.57	
10030	271	3630	9.97	
10545	284	3945	10.50	
11130	297	4290	11.03	
11620	308	4580	11.47	
12130	318	4890	11.88	
13000	336	5400	12.61	
13320	344	5600	12.93	
13830	354	5910	13.34	
14230	362	6150	13.66	
14815	374	6495	14.15	
15425	385	6865	14.59	
20005	396	7205	15.04	
20645	409	7605	15.57	
21310	420	7990	16.01	
21925	431	8365	16.46	
22750	446	8870	17.07	
23250	455	9170	17.43	
23845	465	9525	17.84	
24520	476	9920	18.28	
25110	486	10270	18.69	
25740	497	10660	19.13	
30225	505	10945	19.46	
suction $h_0 = 2$ cm				
hmmss	mm	s	mm	
30630	35	0	0	
30850	54	140	0.77	
31125	64	295	1.18	
31450	76	500	1.66	
31900	91	750	2.27	
32415	110	1065	3.04	
33110	133	1480	3.97	
33650	153	1820	4.78	
34350	177	2240	5.76	
34720	190	2450	6.28	
35100	201	2670	6.73	
35815	225	3105	7.70	
40550	249	3560	8.67	
41200	269	3930	9.49	
41910	291	4360	10.38	
42435	307	4685	11.03	
43035	326	5045	11.80	
43720	346	5450	12.61	
44240	362	5770	13.25	
44845	379	6135	13.94	
45545	400	6555	14.80	
50240	421	6970	15.65	
51115	442	7485	16.50	
51330	448	7620	16.74	

Courbes d'infiltration

Les courbes d'infiltration ne sont pas toutes représentées.

Six infiltrations sont représentées avec deux familles de courbes, une fois avec tous les points de mesure, et une fois tel qu'elles ont été utilisées pour les régressions (à chaque fois les quatre courbes (éq. 4.16 - 4.19) figurent) : Ouro Madiou, solutions 1 à 6

A - 16

Pour les douze autres solutions (7 à 18) sont seulement les courbes avec toutes les points sont montrés

A - 22

Les infiltrations de Ngaoulé ne sont pas toutes représentées, seul les cinq courbes pour lesquelles une correction de l'origine a été effectuée, sont montrées

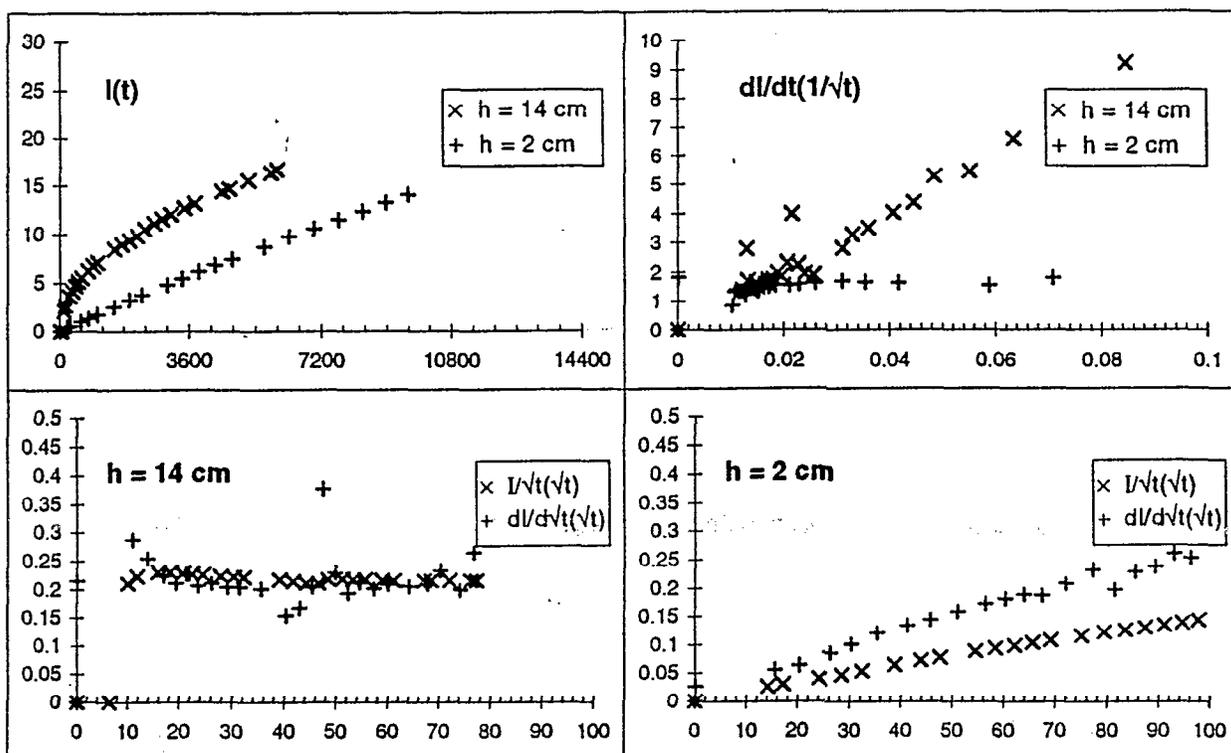
A - 28

Courbes d'infiltration

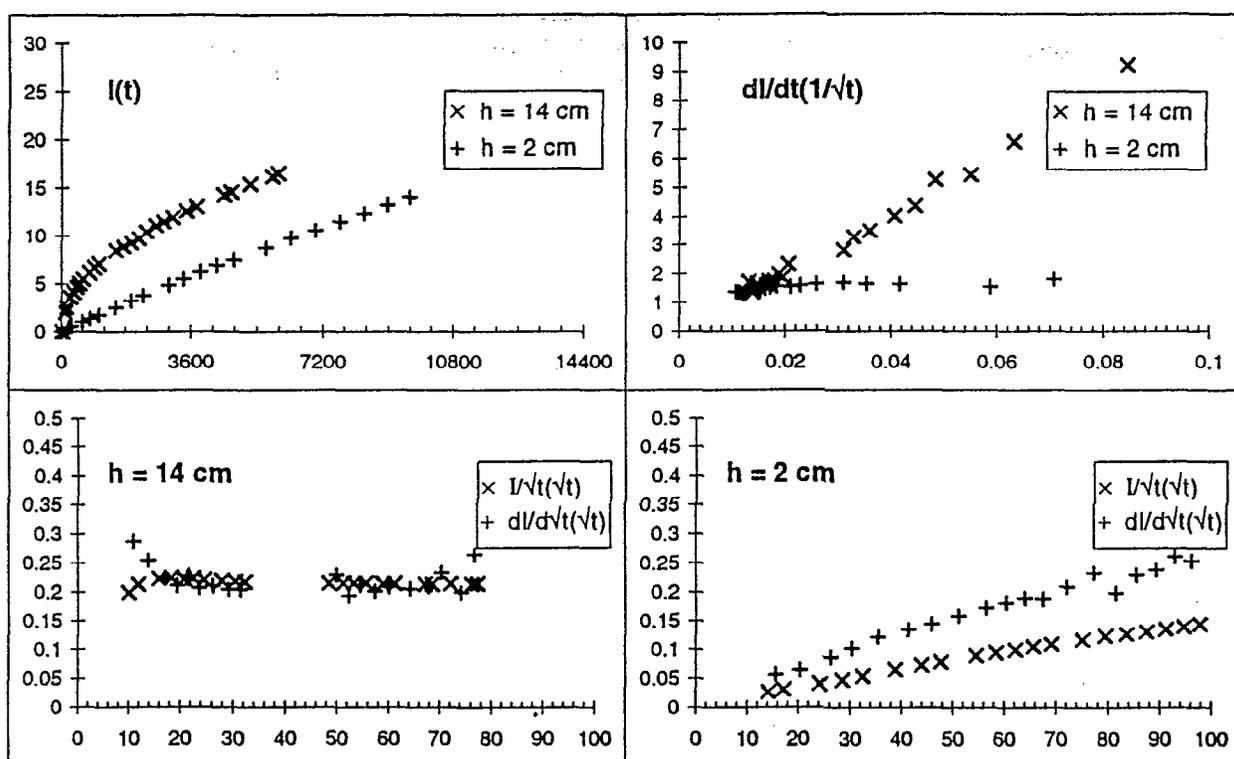
Ouro Madiou, Solution 1

eau distillée

Courbes avec tous les points de mesure



Courbes utilisées pour la régression

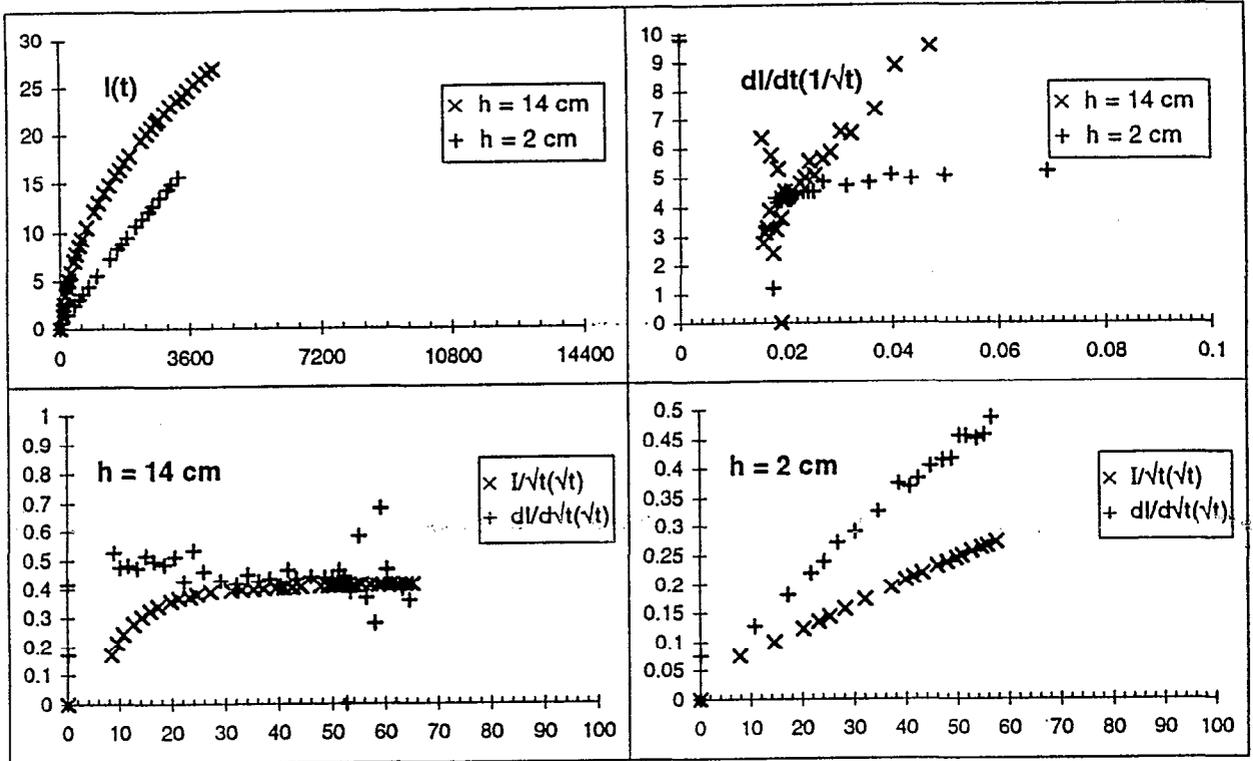


Courbes d'infiltration

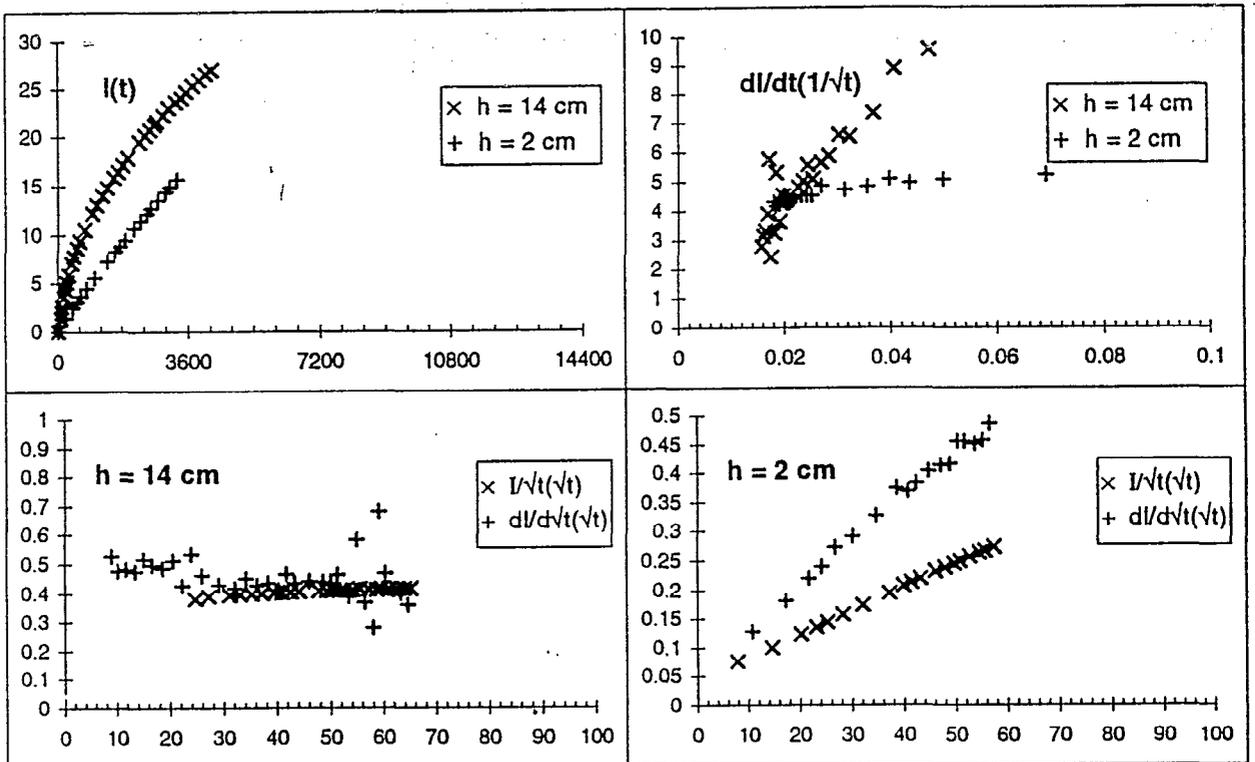
Ouro Madiou, Solution 2

$c = 1 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 0$

Courbes avec tous les points de mesure



Courbes utilisées pour la régression

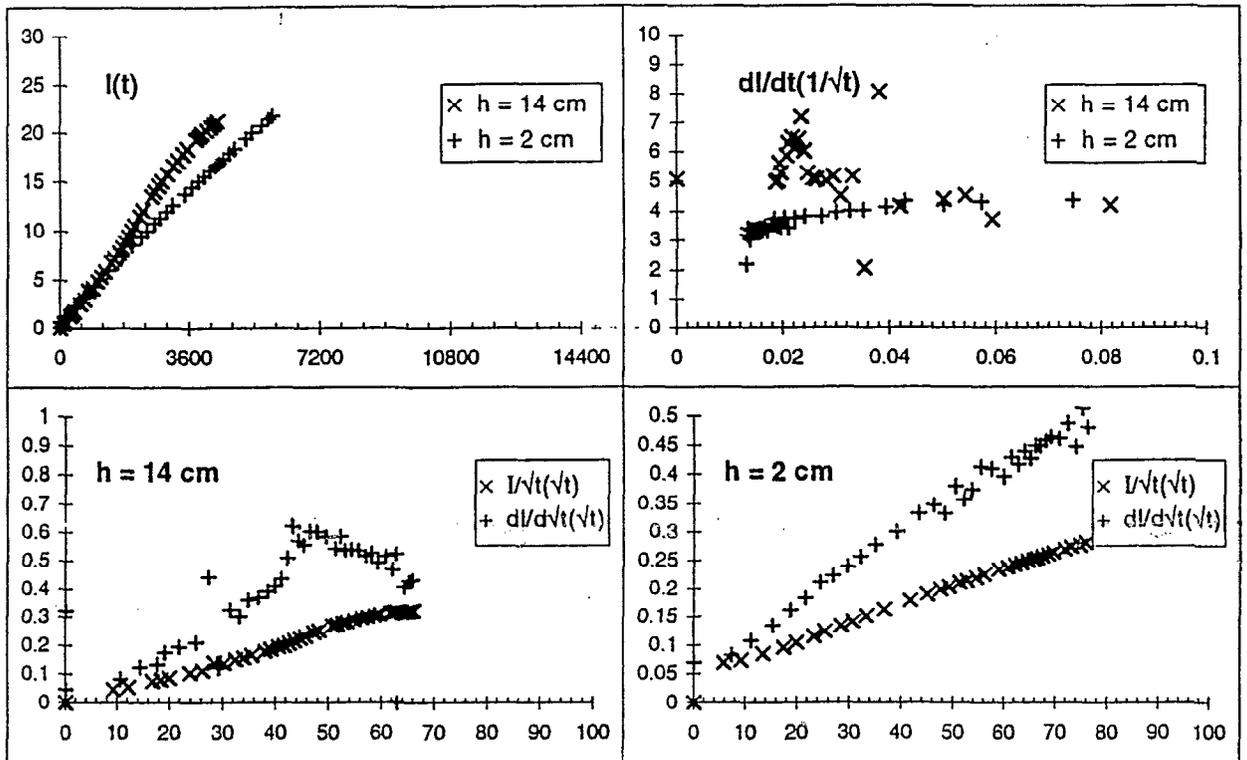


Courbes d'infiltration

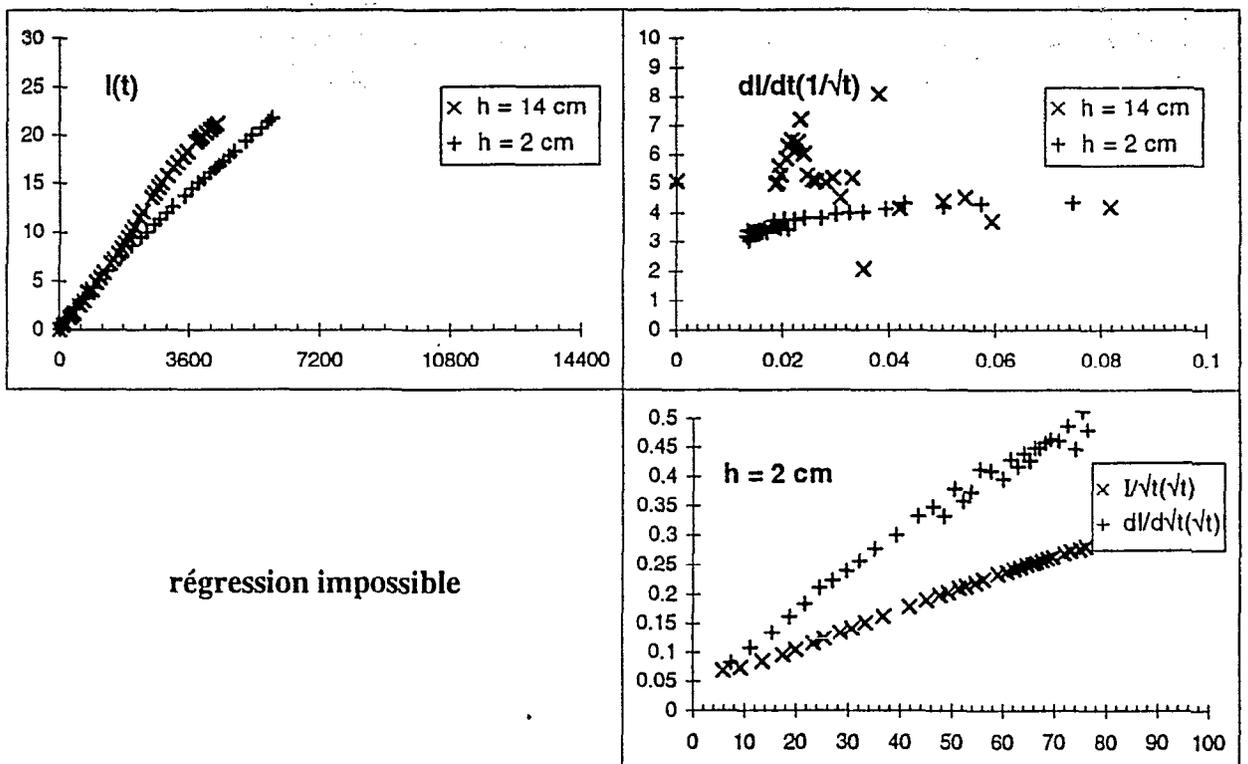
Ouro Madiou, Solution 3

$c = 1 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 1$

Courbes avec tous les points de mesure



Courbes utilisées pour la régression

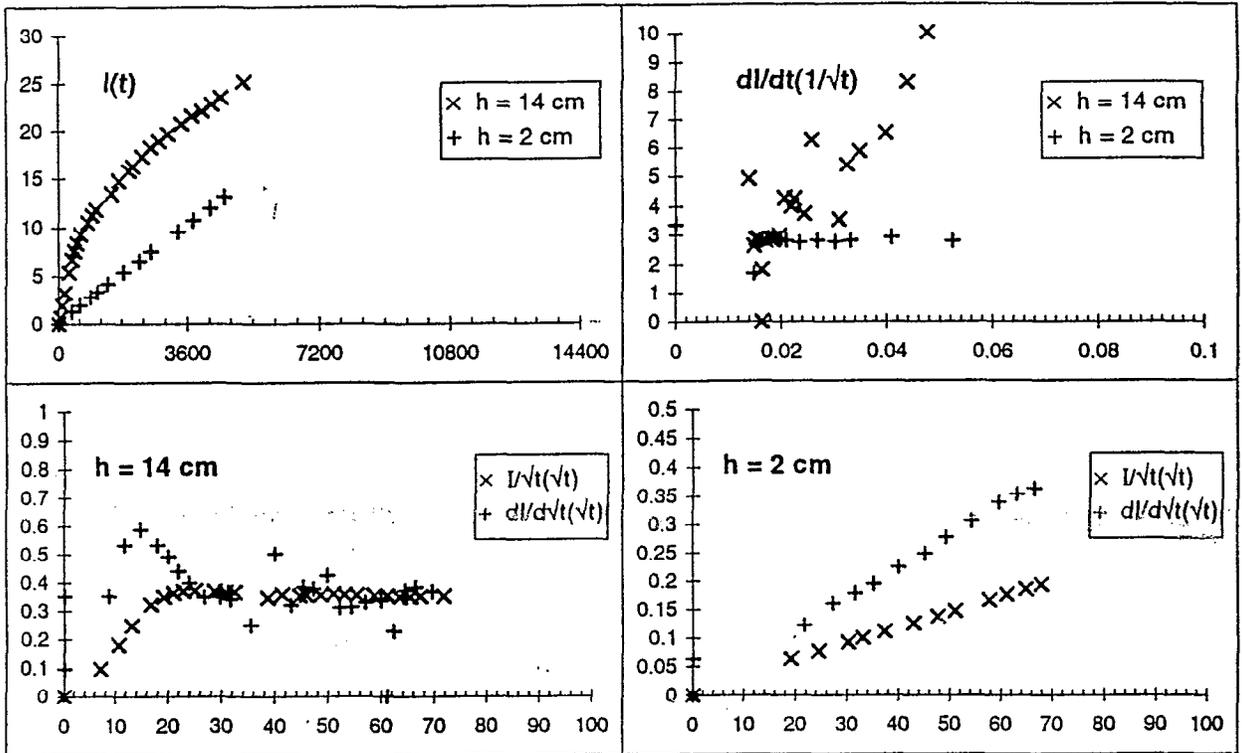


Courbes d'infiltration

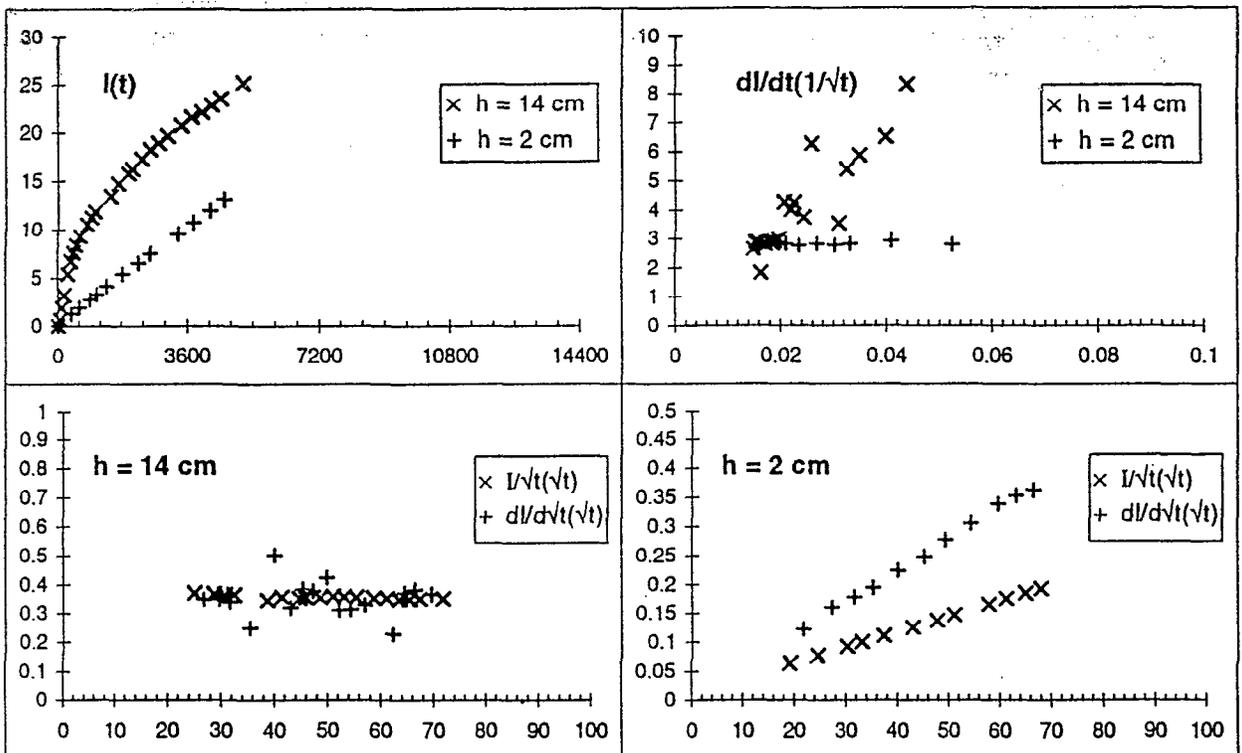
Ouro Madiou, Solution 4

$c = 1 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 2$

Courbes avec tous les points de mesure



Courbes utilisées pour la régression

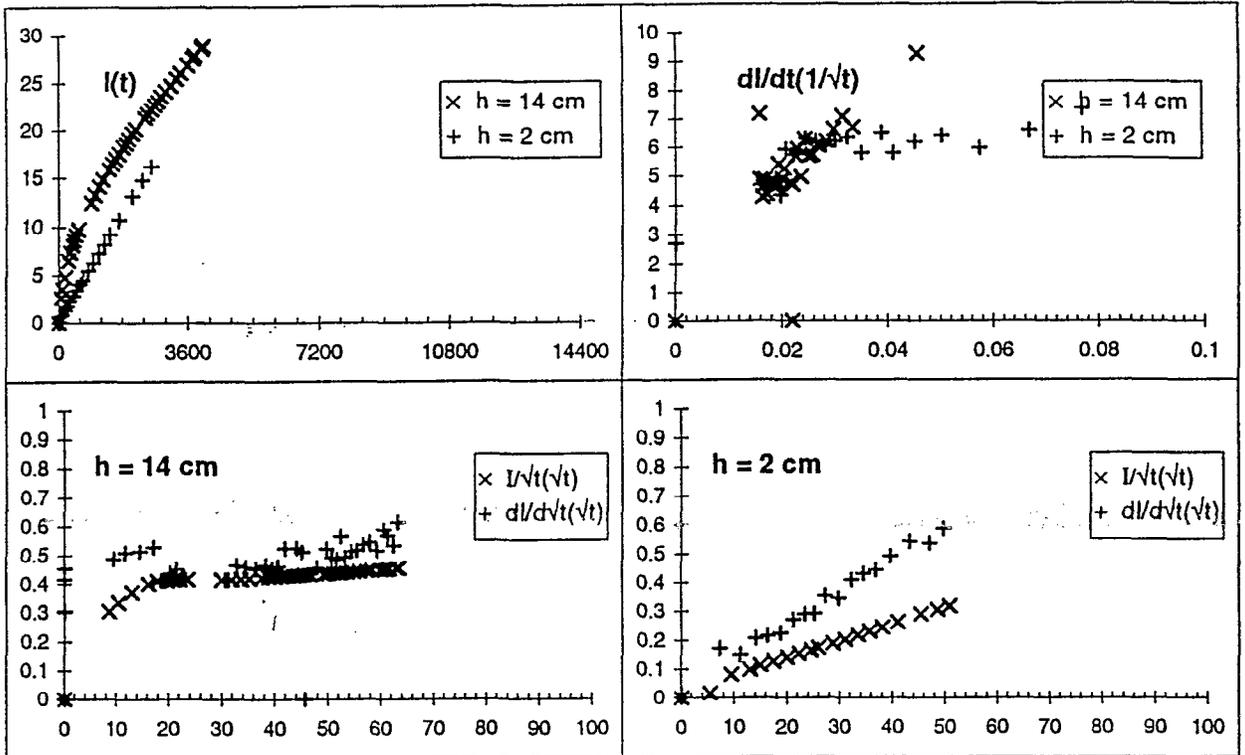


Courbes d'infiltration

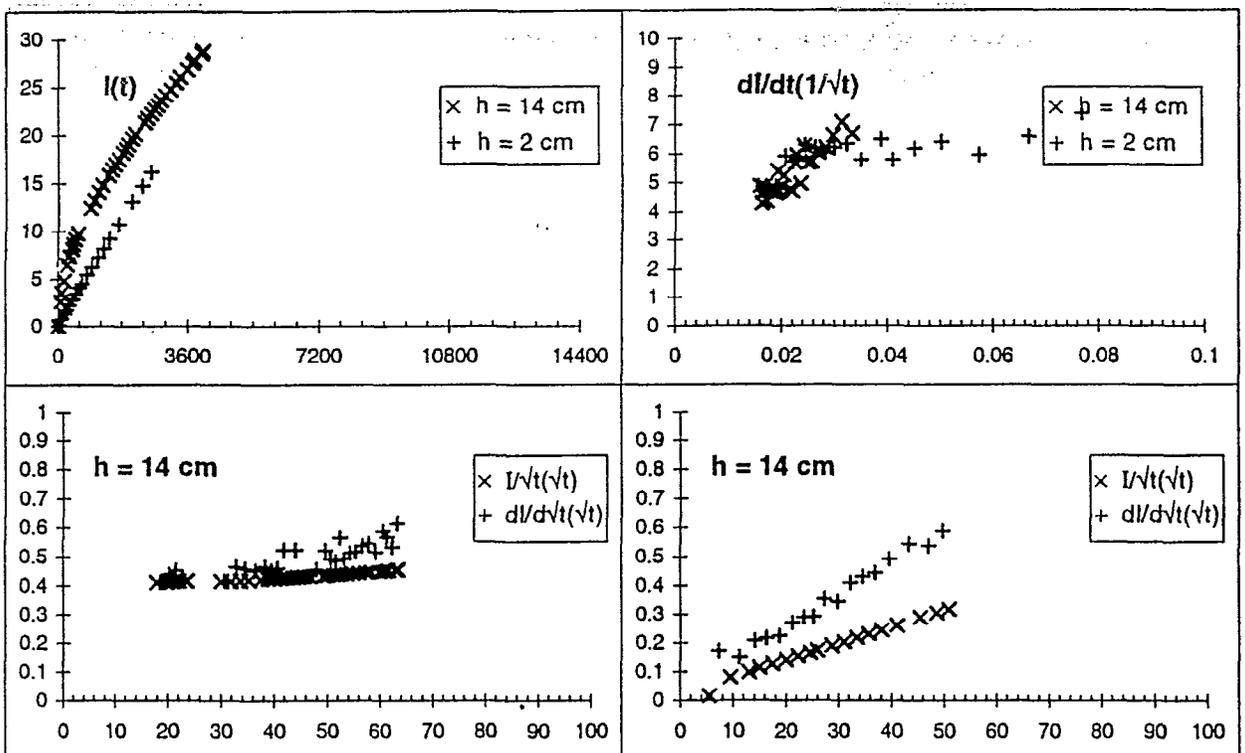
Ouro Madiou, Solution 5

$c = 3 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 0$

Courbes avec tous les points de mesure



Courbes utilisées pour la régression

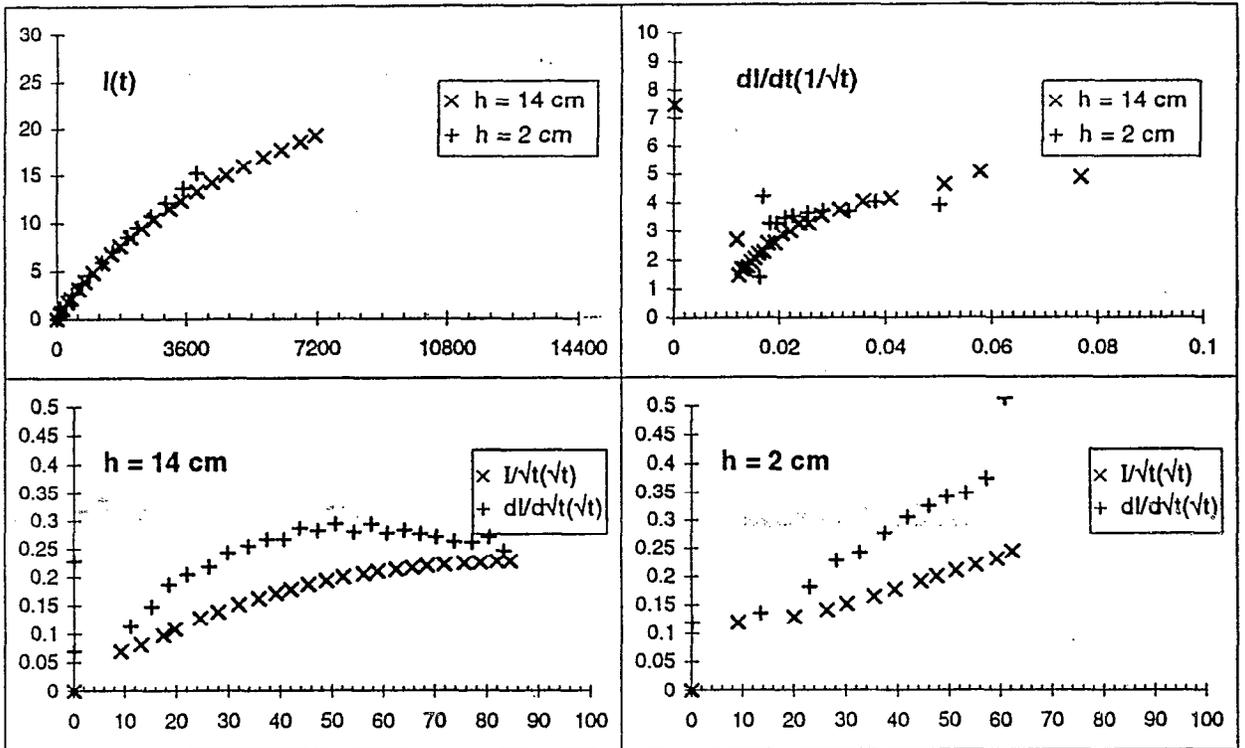


Courbes d'infiltration

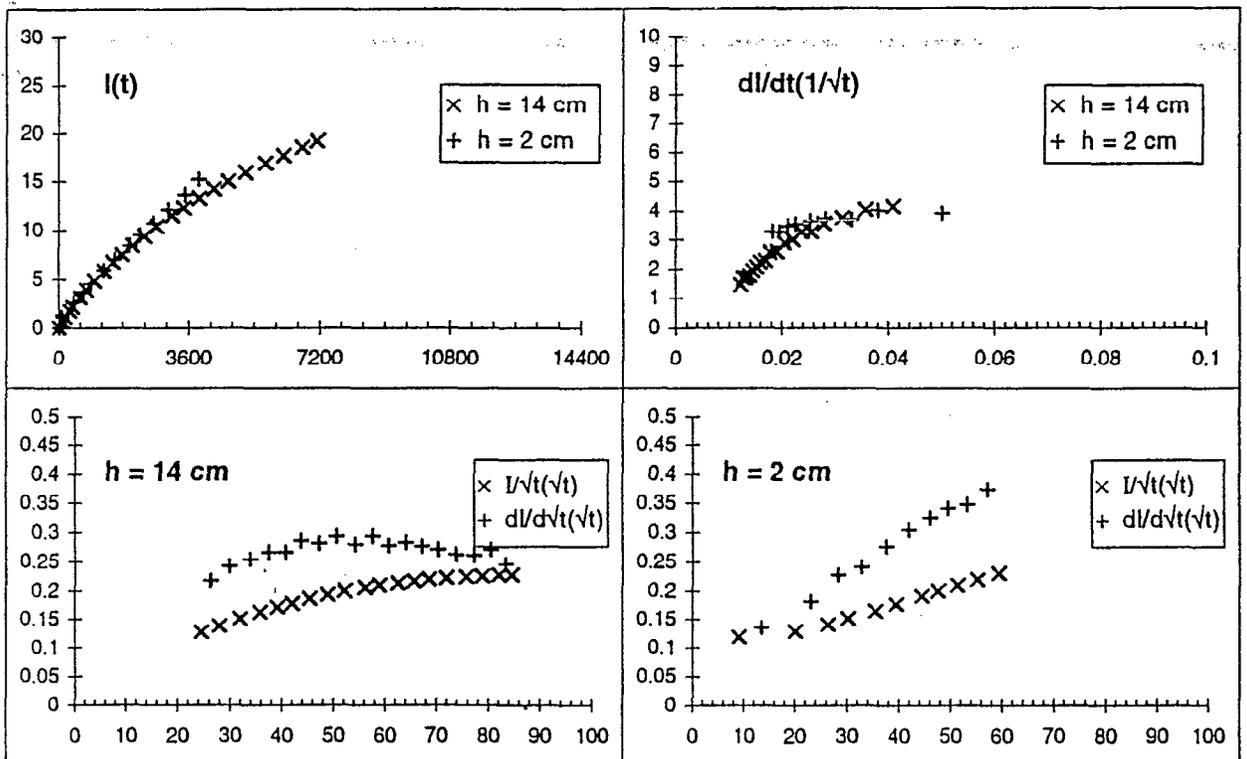
Ouro Madiou, Solution 6

$c = 3 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 1$

Courbes avec tous les points de mesure



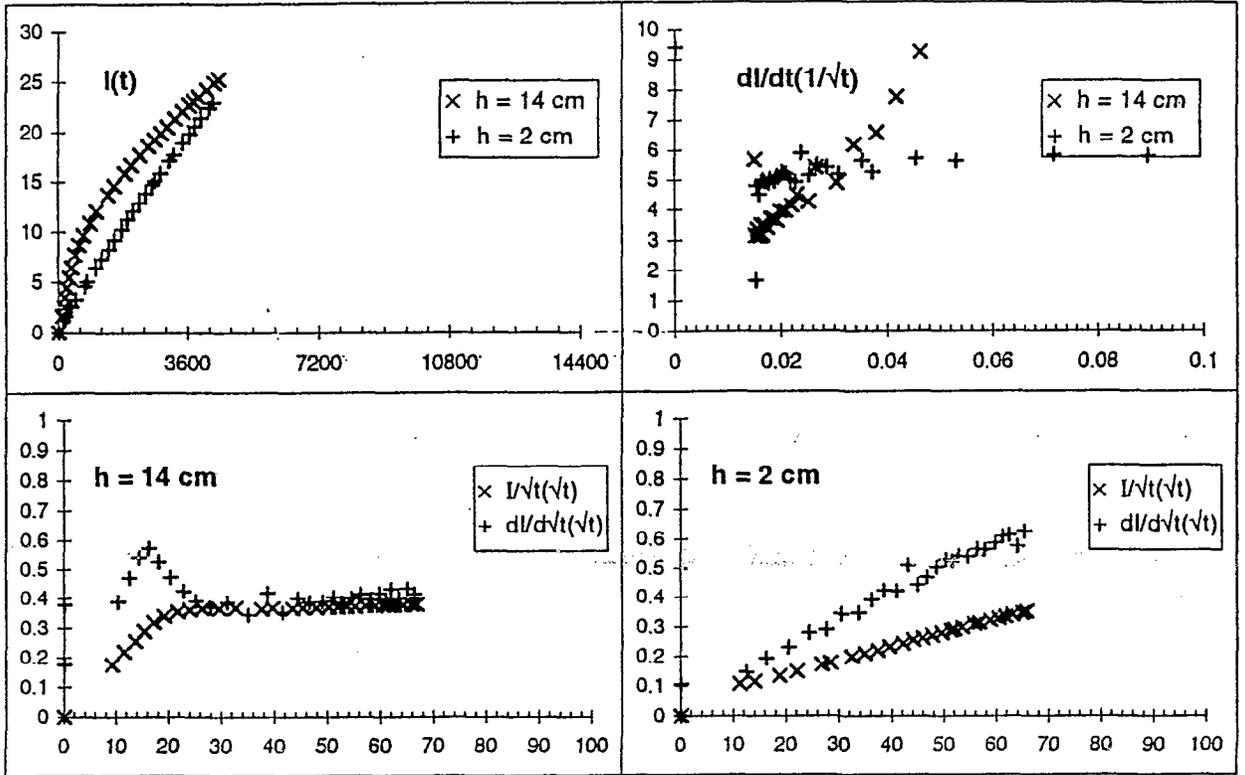
Courbes utilisées pour la régression



Courbes d'infiltration

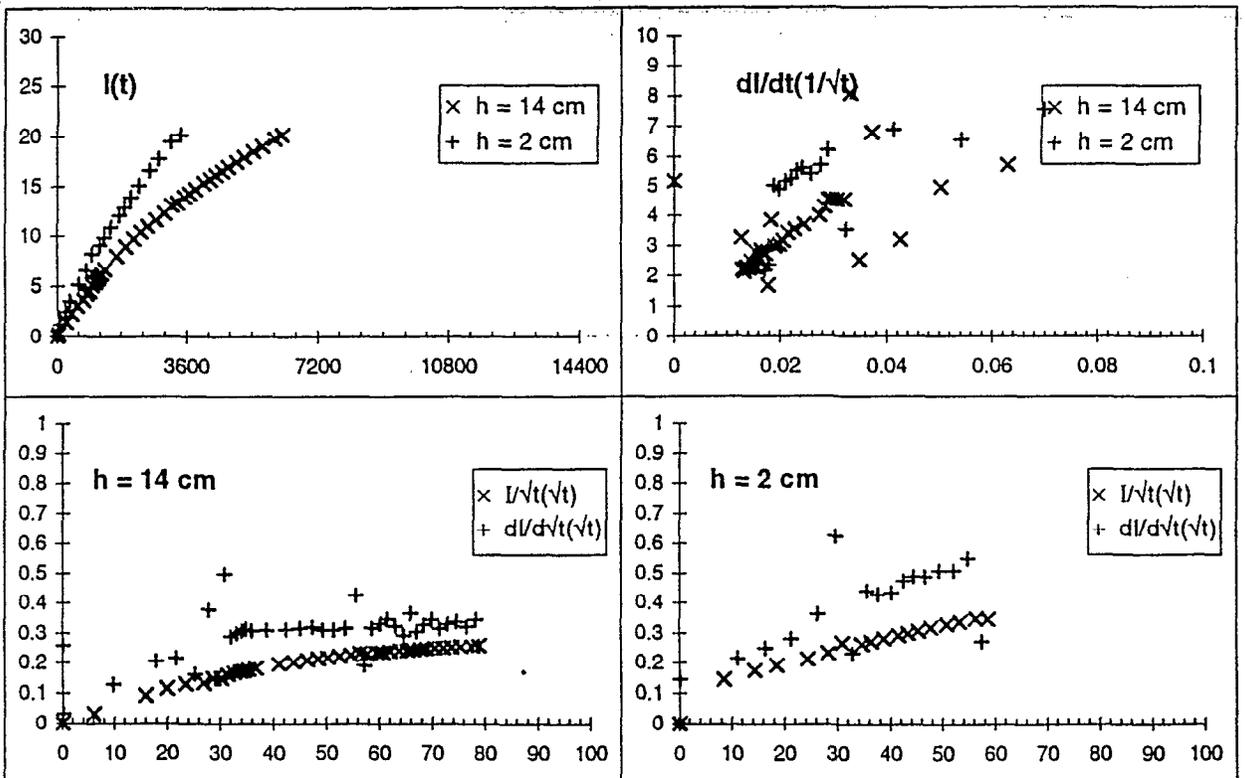
Ouro Madiou, Solution 7

$c = 3 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 2$



Ouro Madiou, Solution 8

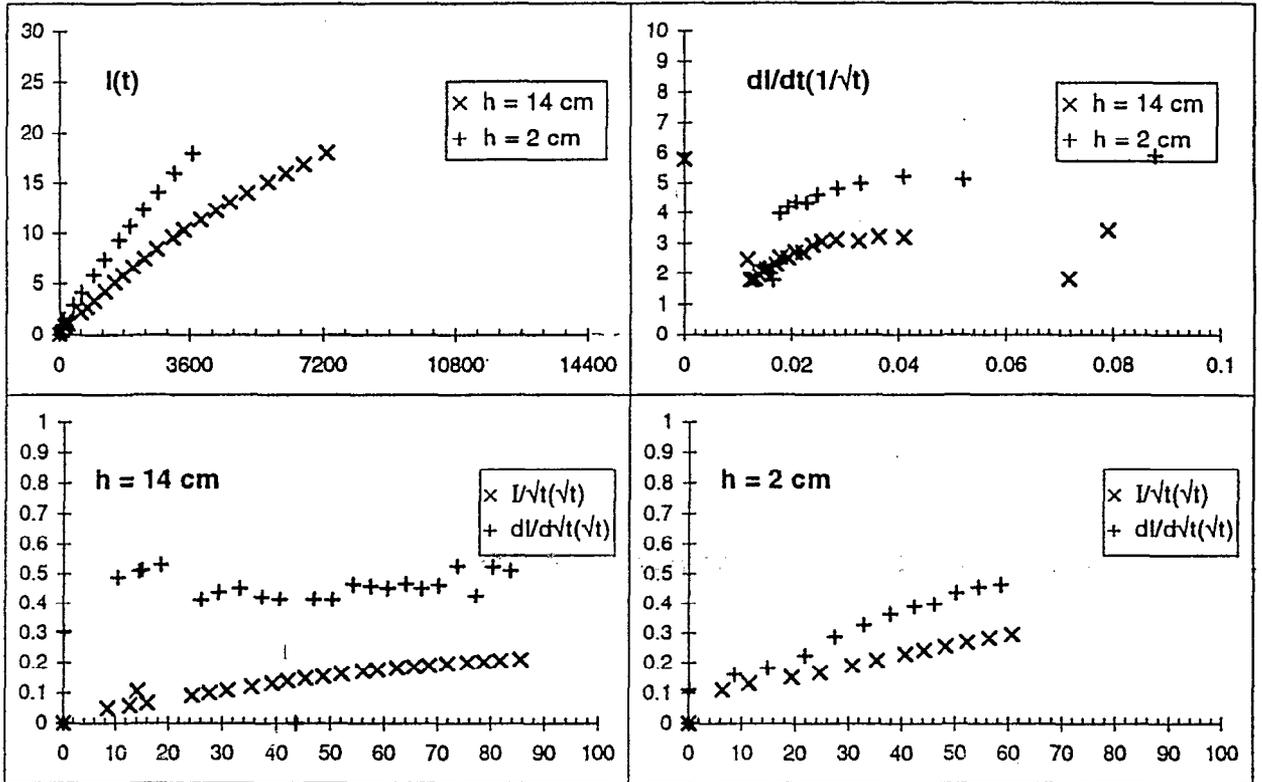
$c = 3 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 5$



Courbes d'infiltration

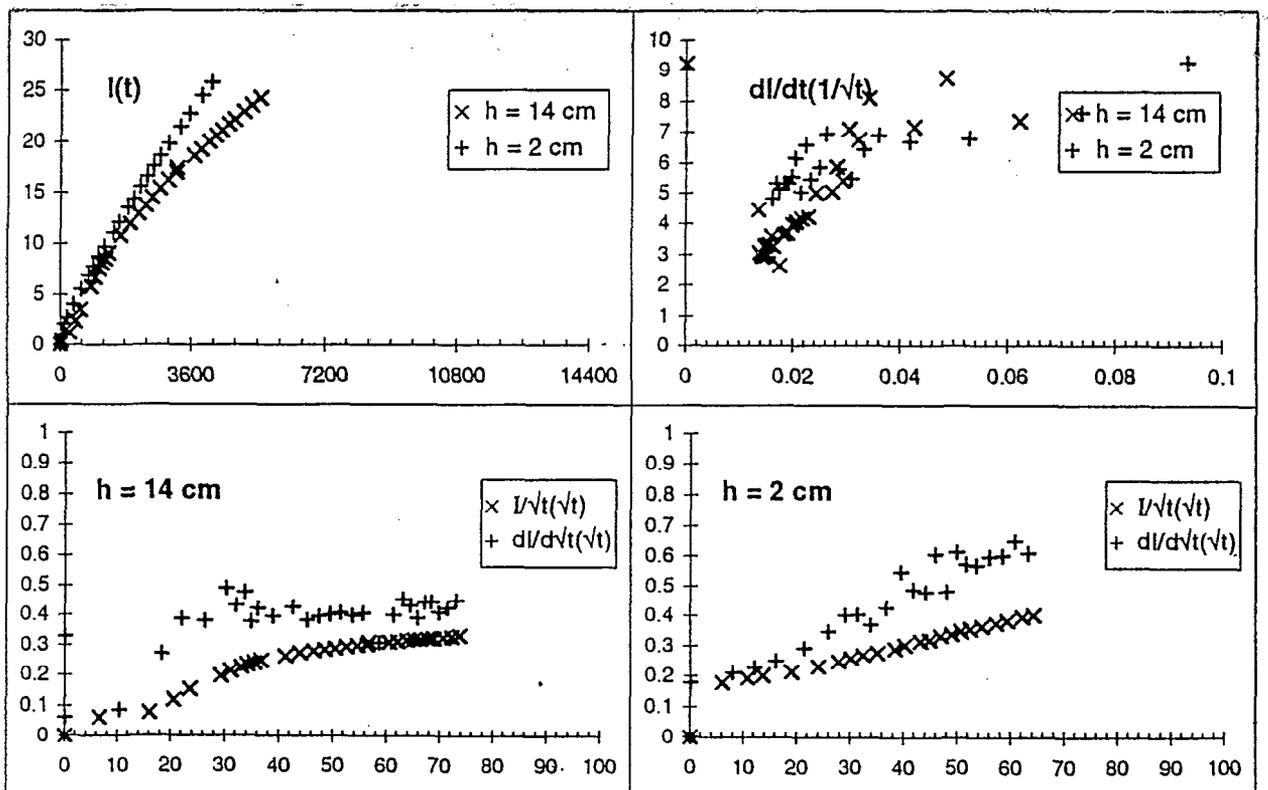
Ouro Madiou, Solution 9

$c = 10 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 2$



Ouro Madiou, Solution 10

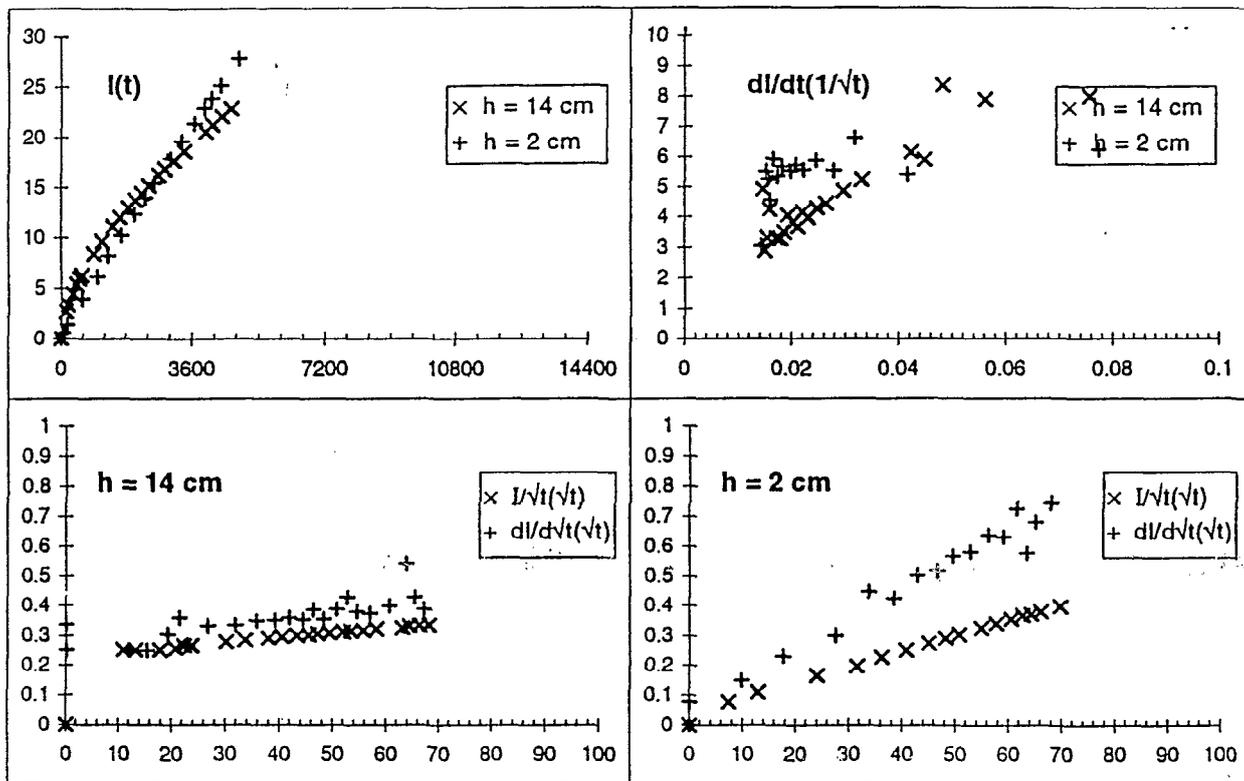
$c = 10 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 5$



Courbes d'infiltration

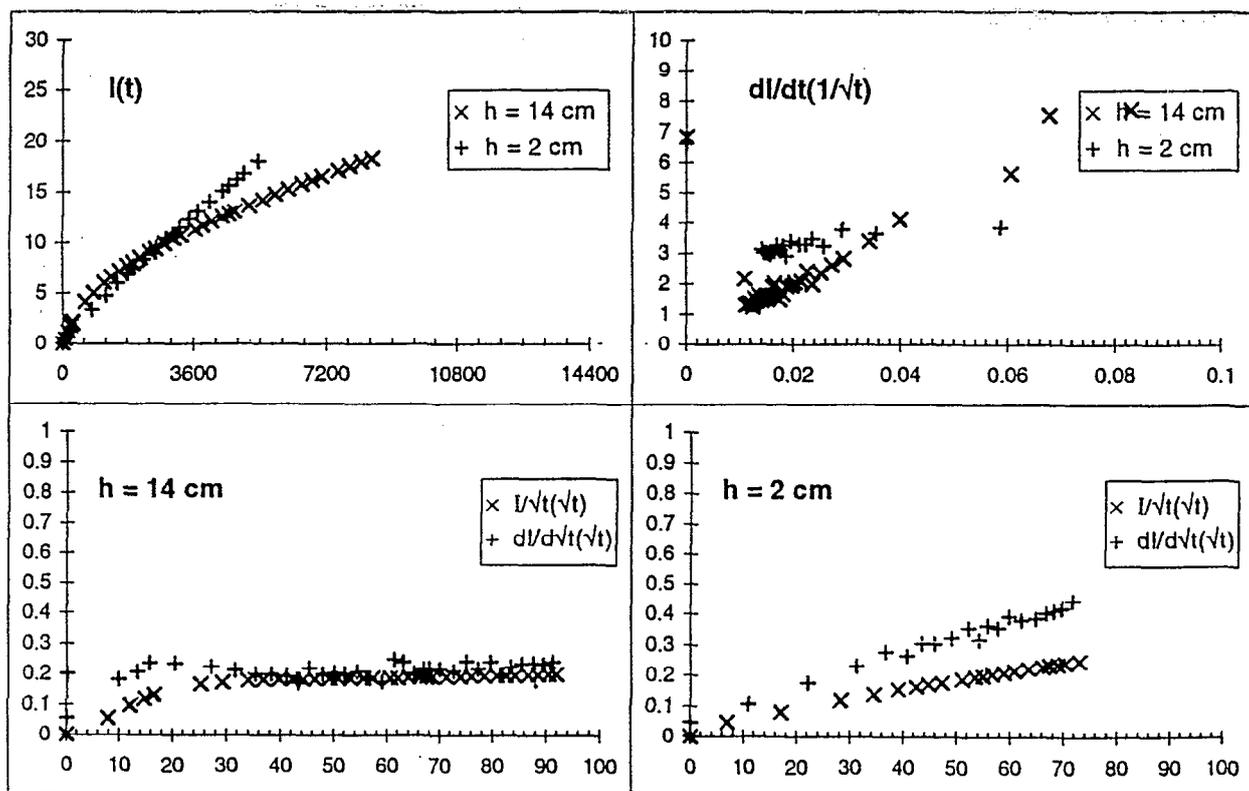
Ouro Madiou, Solution 11

$c = 10 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 10$



Ouro Madiou, Solution 12

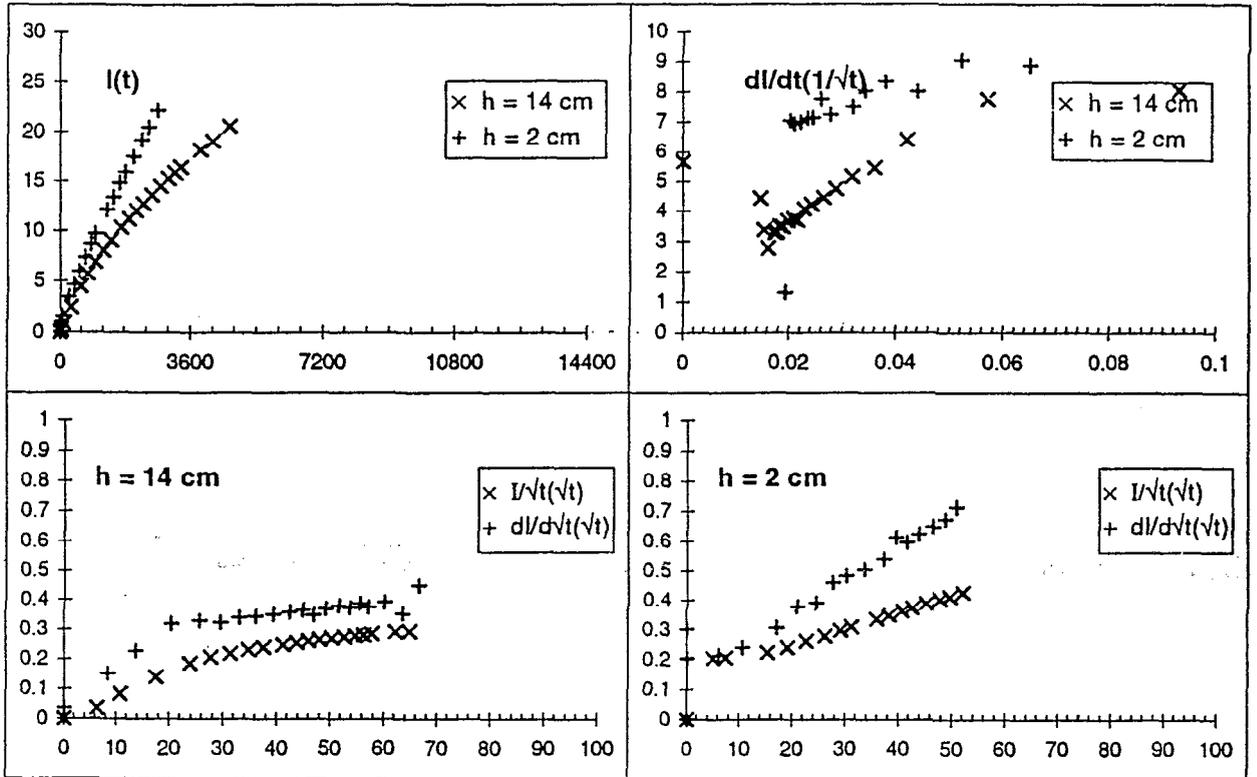
$c = 10 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 20$



Courbes d'infiltration

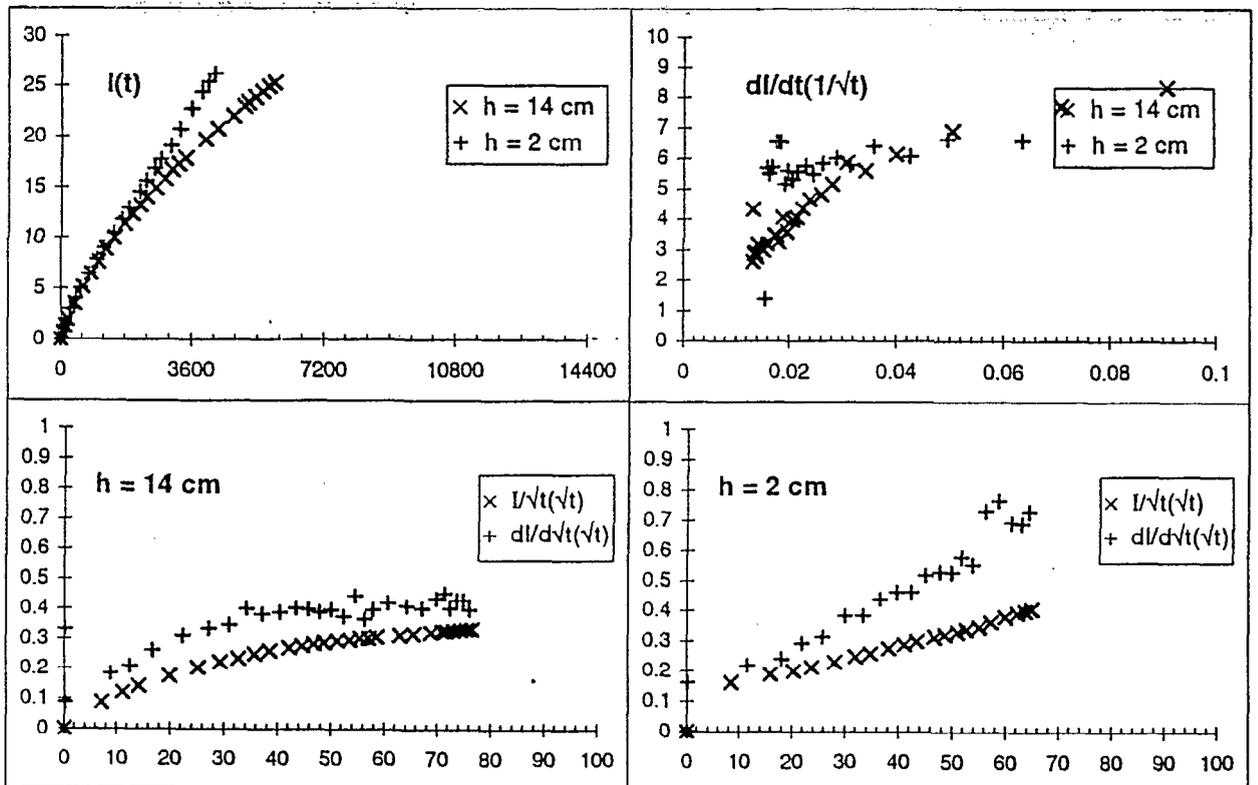
Ouro Madiou, Solution 13

$c = 30 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 10$



Ouro Madiou, Solution 14

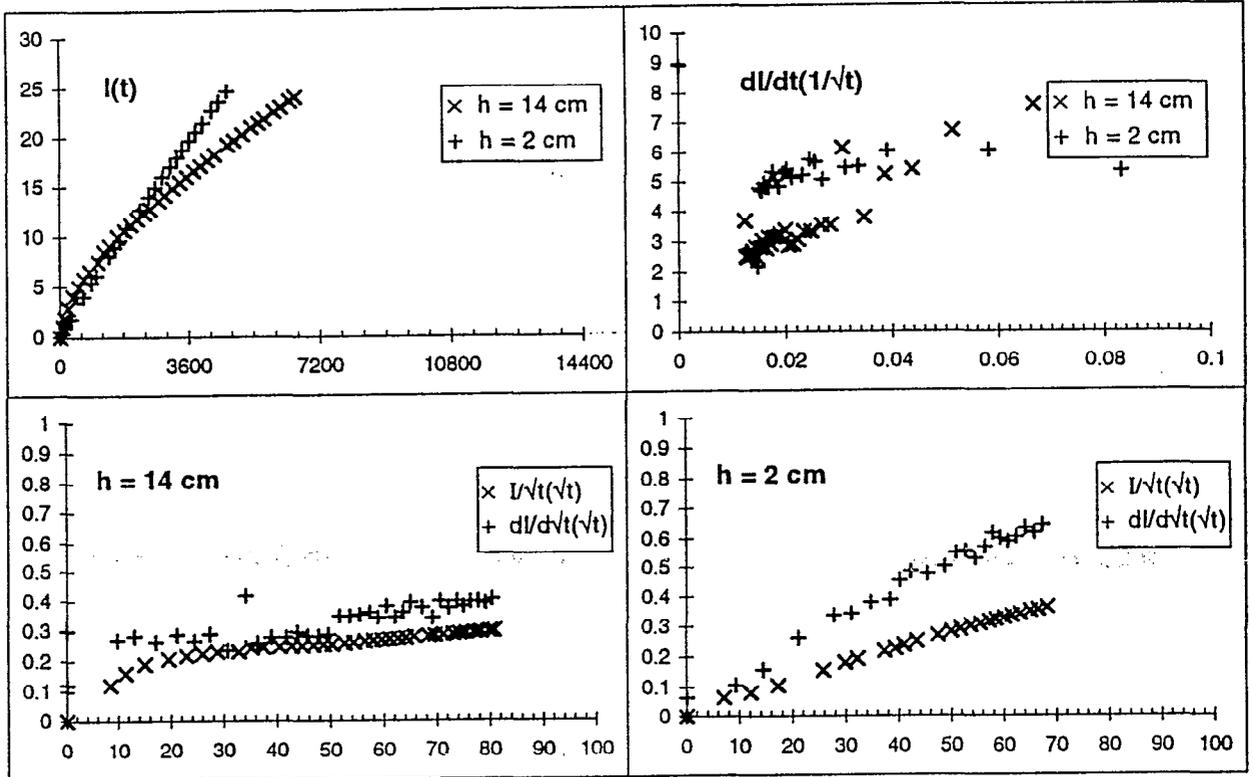
$c = 30 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 20$



Courbes d'infiltration

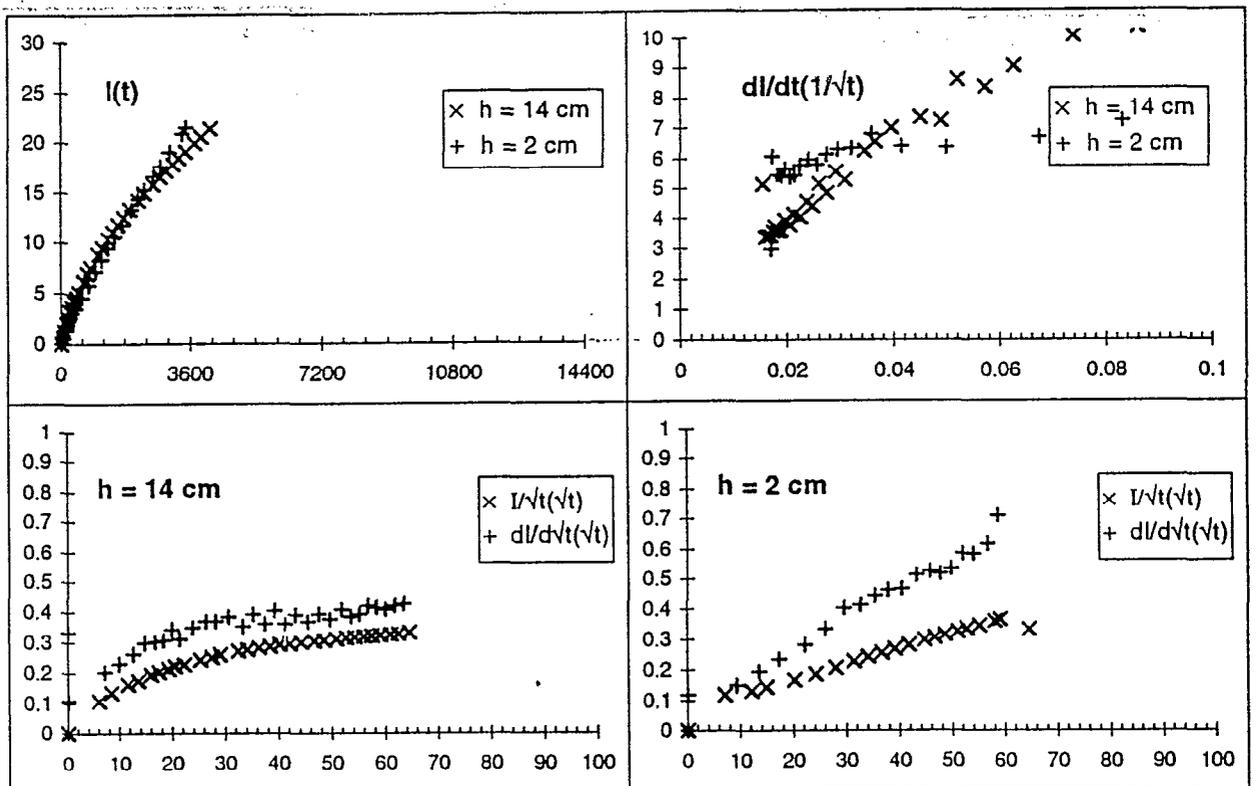
Ouro Madiou, Solution 15

$c = \text{meq/l}$; $\text{SAR} = 40$



Ouro Madiou, Solution 16

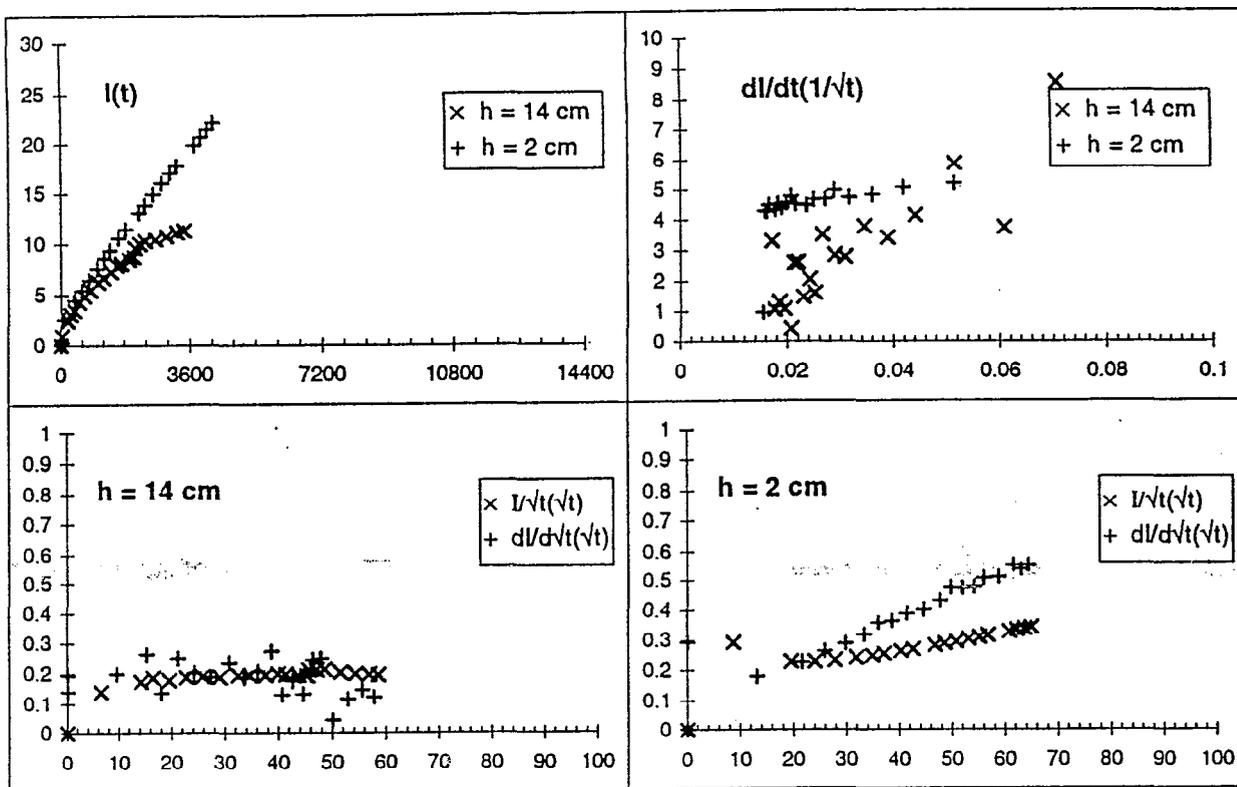
$c = 100 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 20$



Courbes d'infiltration

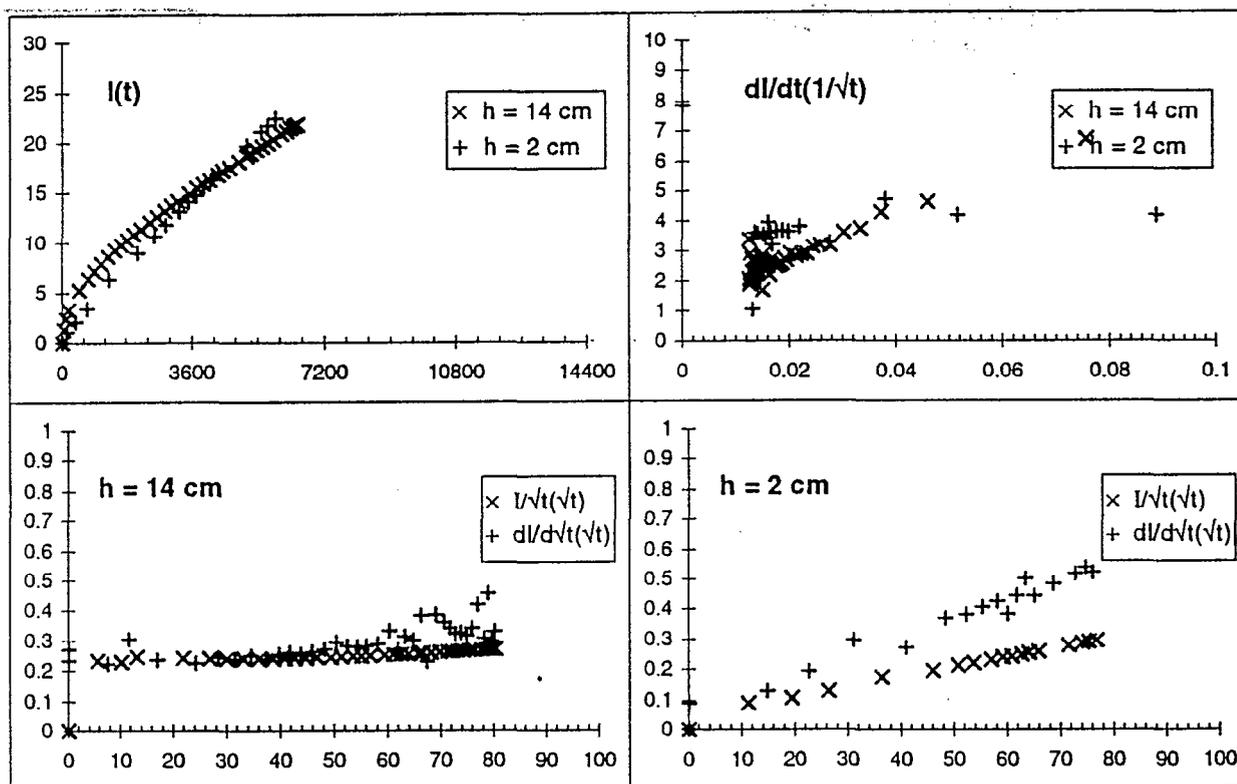
Ouro Madiou, Solution 17

$c = 100 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 40$



Ouro Madiou, Solution 18

$c = 100 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 80$

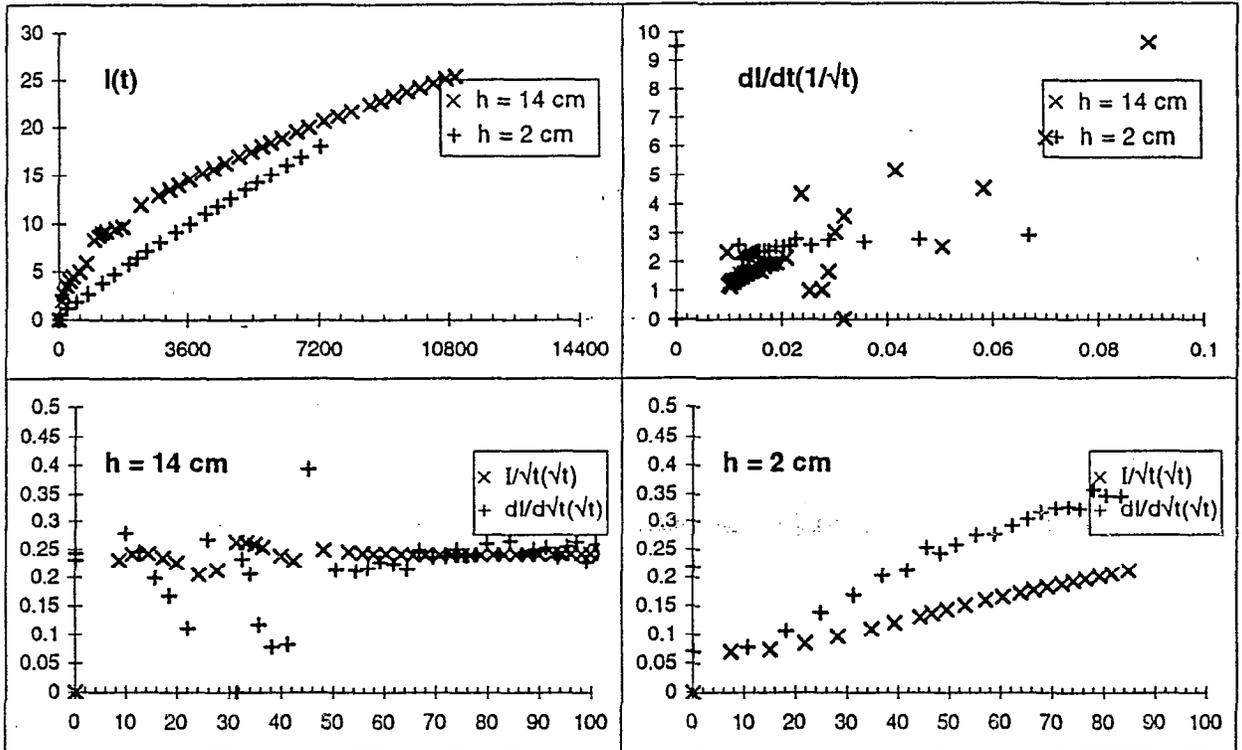


Courbes d'infiltration

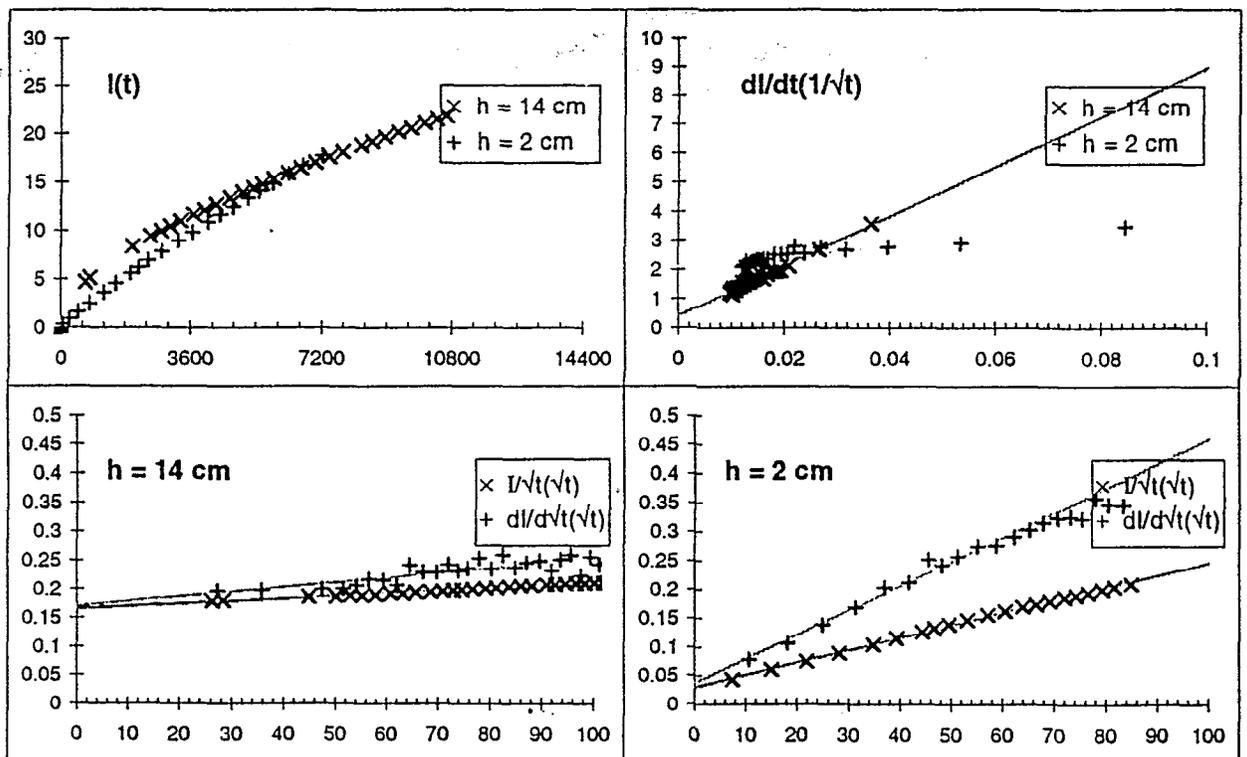
Ngaoulé, Solution 2

$c = 1 \text{ meq/l}; \text{SAR} = 0$

Courbes avec tous les points de mesure



Courbes après correction des origines

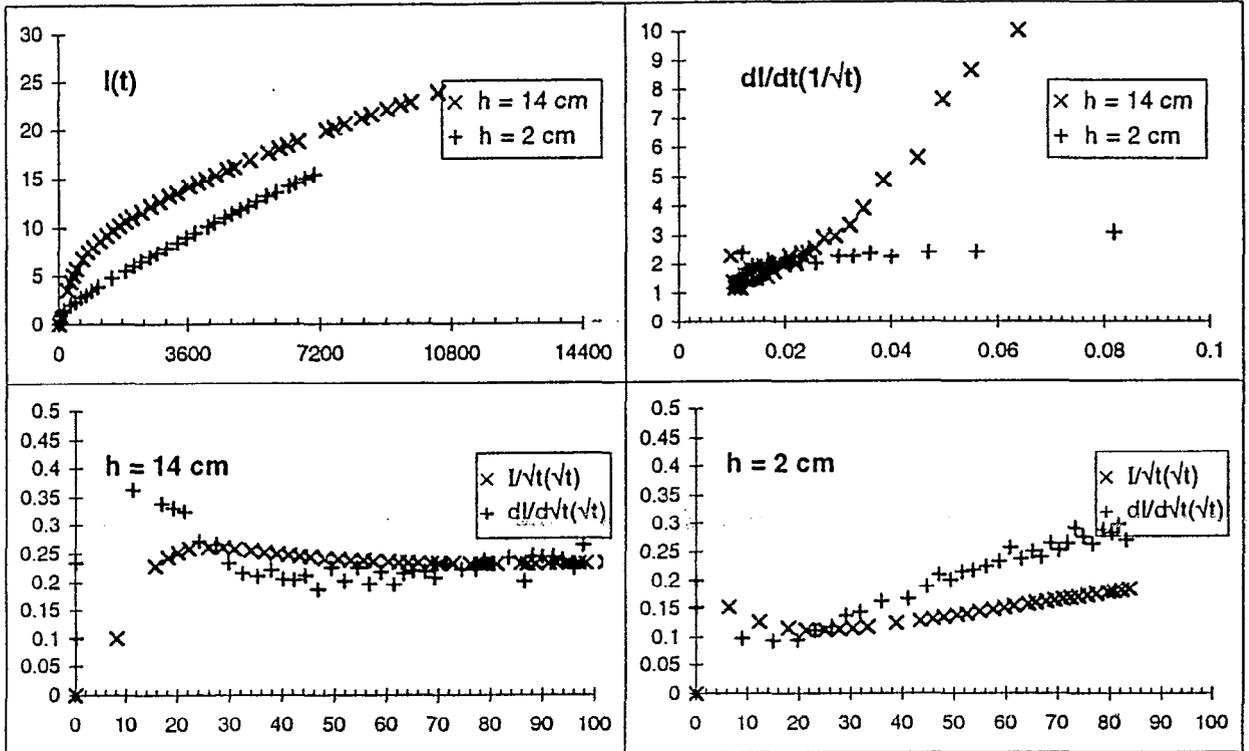


Courbes d'infiltration

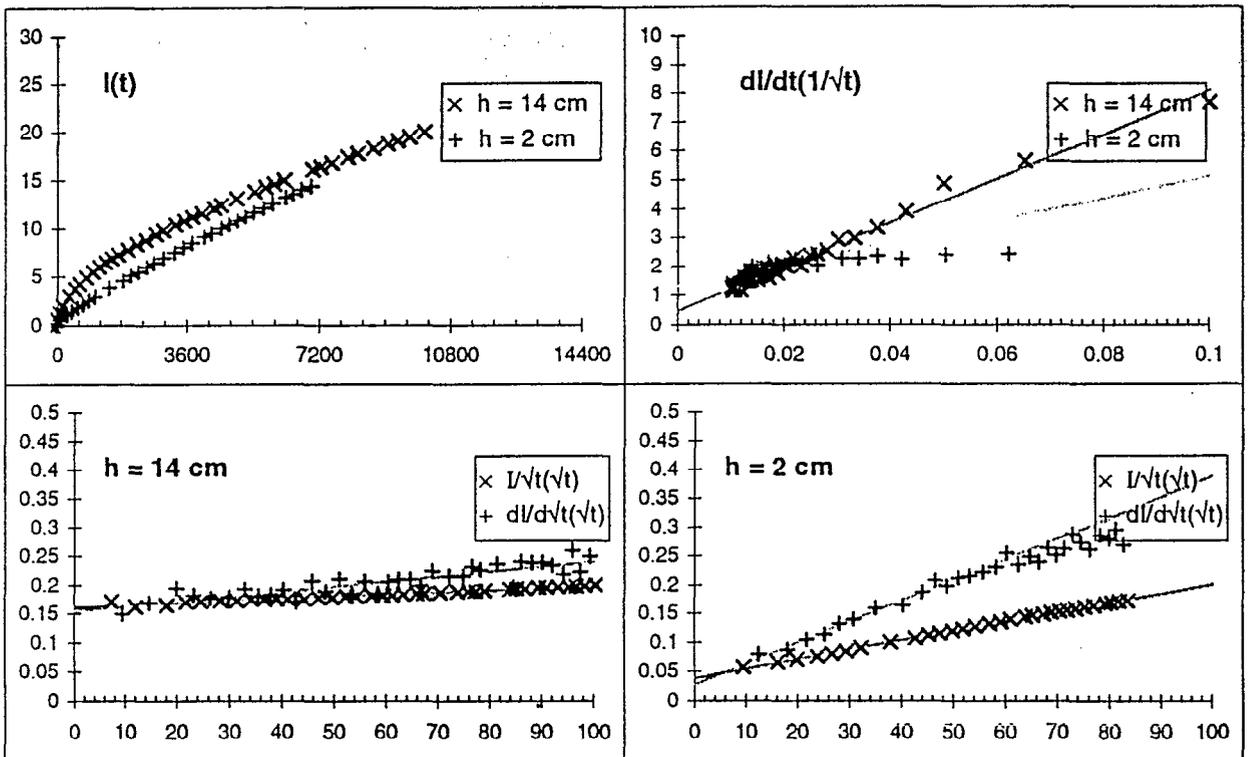
Ngaoulé, Solution 3

$c = 1 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 1$

Courbes avec tous les points de mesure



Courbes après correction des origines

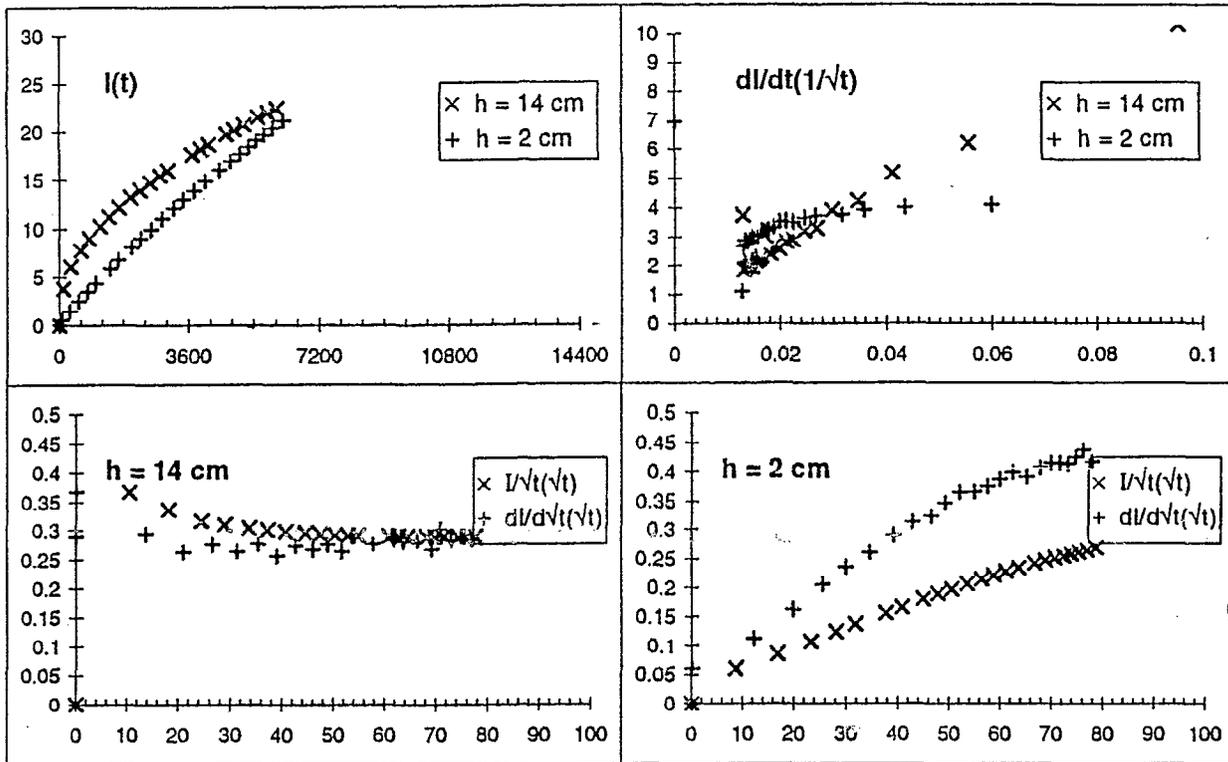


Courbes d'infiltration

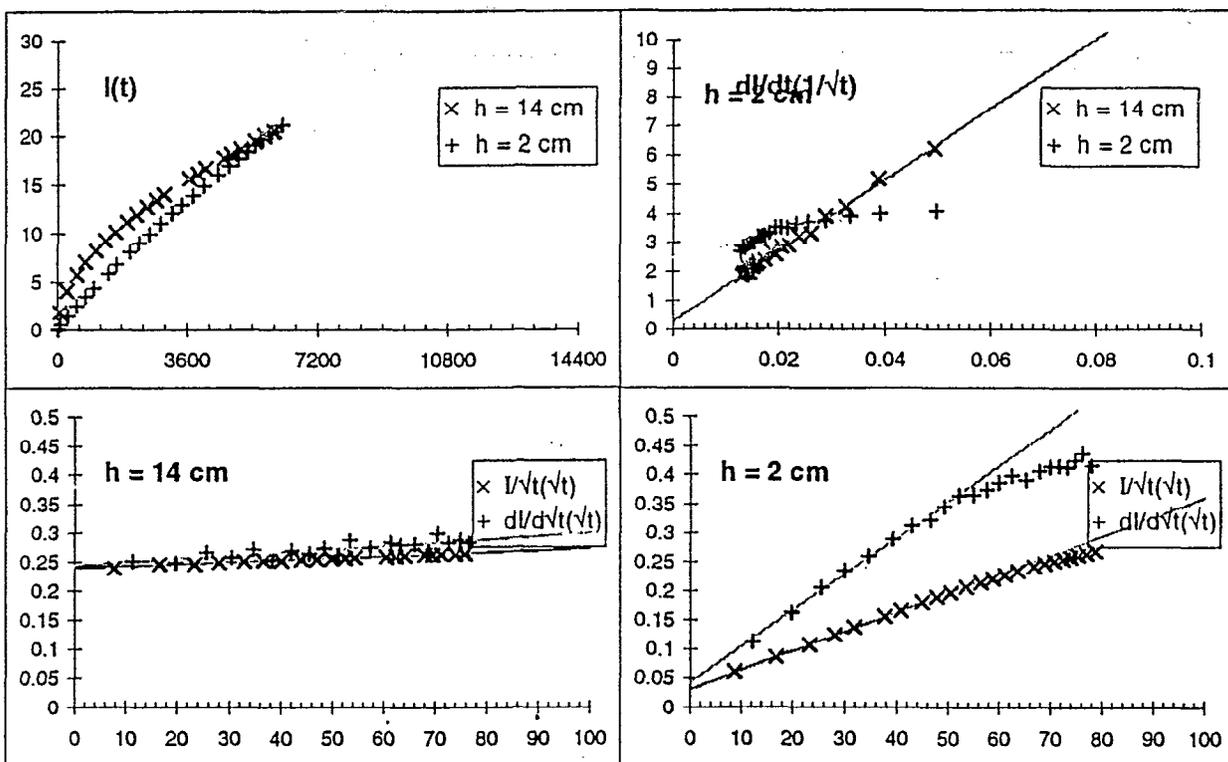
Ngaoulé, Solution 4

$c = 1 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 2$

Courbes avec tous les points de mesure



Courbes après correction des origines

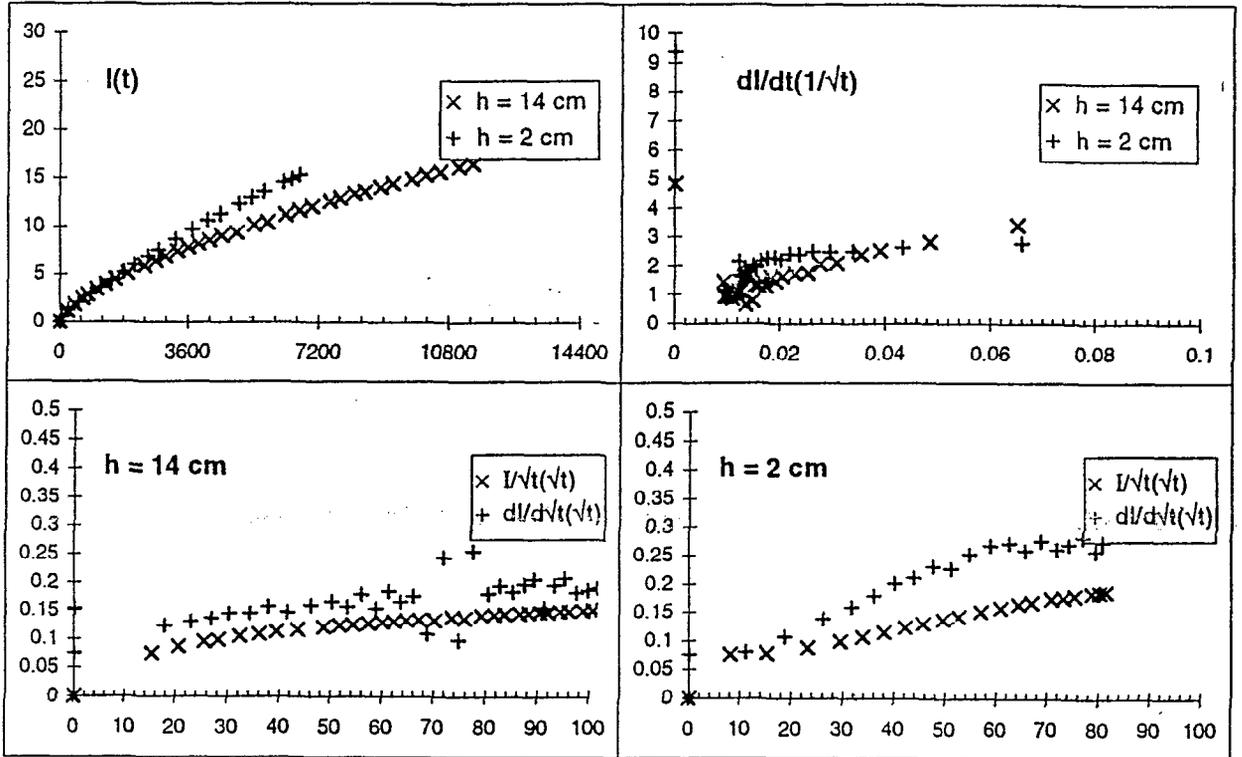


Courbes d'infiltration

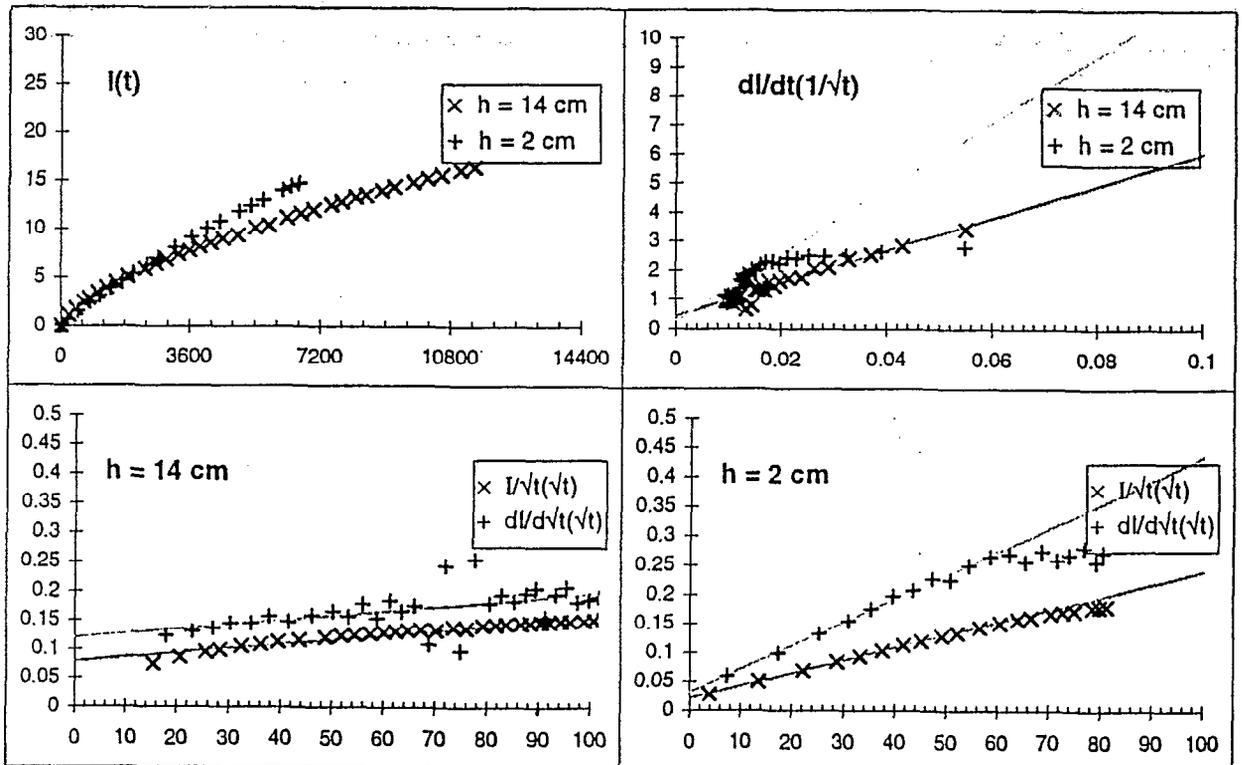
Ngaoulé, Solution 5

$c = 3 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 0$

Courbes avec tous les points de mesure



Courbes après correction des origines

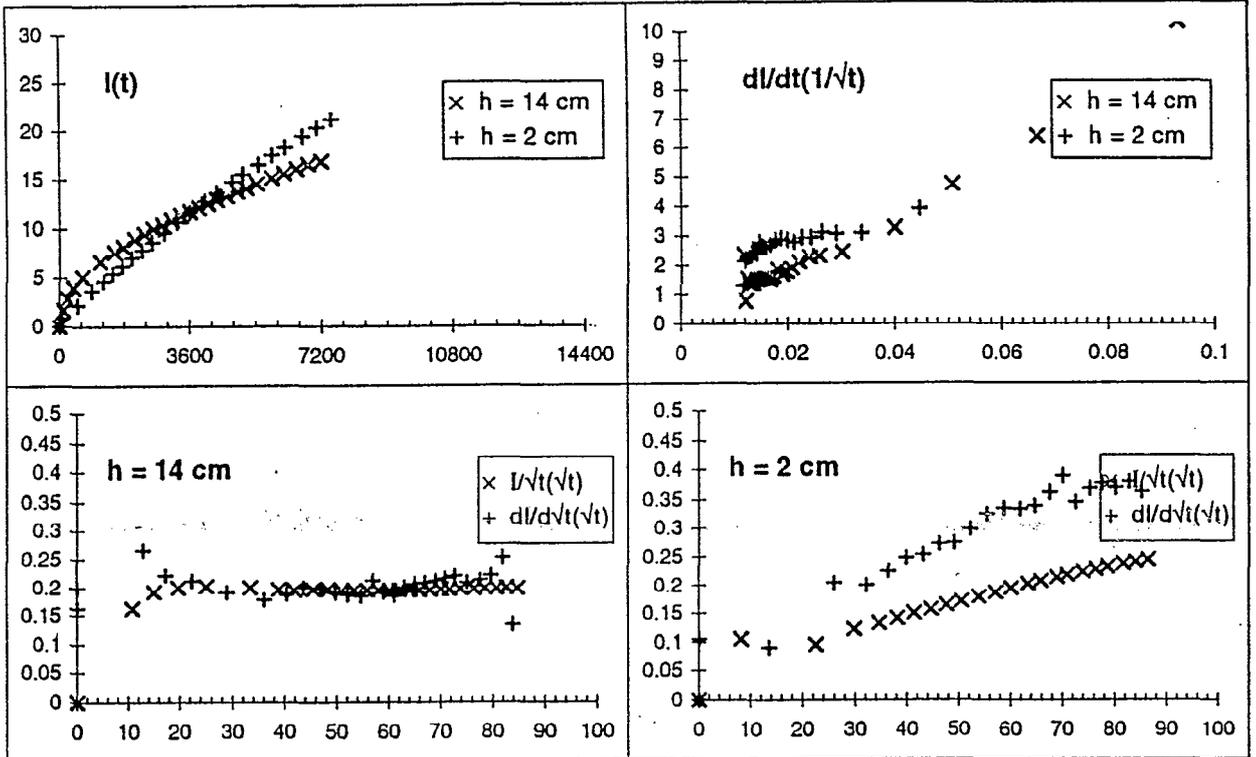


Courbes d'infiltration

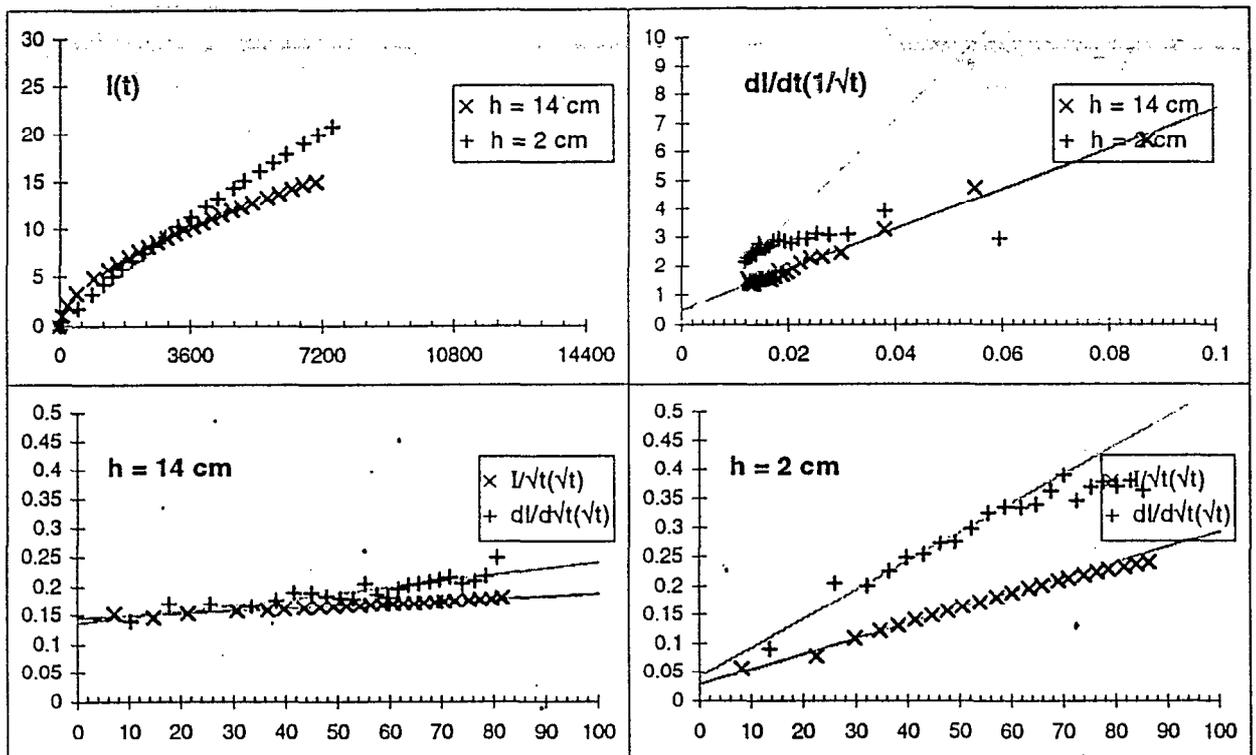
Ngaoulé, Solution 6

$c = 3 \text{ meq/l}$; $\text{SAR} = 1$

Courbes avec tous les points de mesure



Courbes après correction des origines



Ks obtenus par la méthode de Wooding**Ngaoulé**

Solution			Données			Valeur avec α moyen		
no	conc: [meq/l]	SAR	Q _{14 cm} [10 ⁻³ mm/s]	Q _{2 cm} [10 ⁻³ mm/s]	α [cm-1]	K _s [10 ⁻³ mm/s]	K _s ' [10 ⁻³ mm/s]	K _s /K _s
1	eau distillée		0.62	1.09	0.048	0.357	0.364	1.02
2	1	0	1.20	2.07	0.046	0.657	0.698	1.06
3	1	1	1.20	1.62	0.025	0.310	0.619	1.99
4	1	2	1.85	2.67	0.031	0.605	0.985	1.63
5	3	0	0.95	1.70	0.049	0.563	0.563	1.00
6	3	1	1.39	2.13	0.036	0.548	0.763	1.39
7	3	2	1.83	2.96	0.040	0.848	1.032	1.22
8	3	5	1.48	3.41	0.070	1.497	0.996	0.67
9	10	2	1.56	2.51	0.039	0.700	0.878	1.25
10	10	5	1.44	2.50	0.046	0.798	0.842	1.05
11	10	10	1.77	4.15	0.071	1.853	1.201	0.65
13	30	10	1.36	2.63	0.055	0.962	0.839	0.87
14	30	20	1.24	2.77	0.067	1.181	0.822	0.70
15	30	40	1.80	2.91	0.040	0.826	1.015	1.23
16	100	20	1.23	2.61	0.063	1.058	0.795	0.75
17	100	40	1.53	3.31	0.064	1.368	0.998	0.73
18	100	80	1.14	1.72	0.034	0.430	0.621	1.45

 α moyen 0.0485**Ouro Madiou**

Solution			Données			Valeur avec α moyen		
no	conc: [meq/l]	SAR	Q _{14 cm} [10 ⁻³ mm/s]	Q _{2 cm} [10 ⁻³ mm/s]	α [cm-1]	K _s [10 ⁻³ mm/s]	K _s ' [10 ⁻³ mm/s]	K _s /K _s
1	eau distillée		1.53	1.36	-0.020	-	0.632	-
2	1	0	2.96	4.22	0.059	1.634	1.548	0.95
3	1	1	3.27	3.27	0.000	-	1.211	-
4	1	2	2.76	2.77	0.001	0.015	1.211	80.73
5	3	0	4.57	5.82	0.040	1.662	2.259	1.36
6	3	1	1.58	3.27	0.061	1.291	1.177	0.91
7	3	2	3.22	4.64	0.061	1.839	1.693	0.92
8	3	5	2.15	4.94	0.069	2.161	1.687	0.78
9	10	2	1.78	4.08	0.069	1.781	1.395	0.78
10	10	5	3.01	5.06	0.043	1.531	2.021	1.32
11	10	10	3.08	5.36	0.046	1.709	2.104	1.23
12	10	20	1.31	3.07	0.071	1.367	1.038	0.76
13	30	10	3.08	7.00	0.068	3.032	2.404	0.79
14	30	20	2.74	5.58	0.059	2.165	2.025	0.93
15	30	40	2.50	4.73	0.053	1.686	1.781	1.06
16	100	20	3.37	5.42	0.040	1.526	2.213	1.45
17	100	40	2.61	4.29	0.041	1.252	1.733	1.38
18	100	80	1.96	3.51	0.049	1.165	1.358	1.17

 α moyen 0.0558

Ks obtenus par le régime transitoire

avec erreur due à la régression

Ngaoulé

Solution						
no	conc:	SAR	K _{2 cm}	+/-	K _{14 cm}	+/-
	[meq/l]		[10-3 mm/s]		[10-3 mm/s]	
1	eau distillée		1.62	0.29	-1.97	0.49
2	1	0	3.85	0.11	-0.56	0.81
3	1	1	2.78	0.36	-1.21	0.79
4	1	2	5.36	0.69	-2.01	1.43
5	3	0	3.18	0.48	0.81	0.39
6	3	1	4.24	0.98	0.06	0.58
7	3	2	5.63	0.15	0.76	0.92
8	3	5	6.48	0.25	-0.55	0.07
9	10	2	4.61	0.30	0.44	2.05
10	10	5	4.41	0.26	-2.18	0.33
11	10	10	7.89	0.26	1.37	1.37
13	30	10	4.69	0.36	-0.54	0.14
14	30	20	5.41	0.19	-0.21	0.23
15	30	40	5.50	0.29	-1.29	1.42
16	100	20	5.25	0.32	-1.68	0.73
17	100	40	6.26	0.18	0.05	0.32
18	100	80	3.55	0.26	0.25	0.19

Ouro Madiou

Solution						
no	conc:	SAR	K _{2 cm}	+/-	K _{14 cm}	+/-
	[meq/l]		[10-3 mm/s]		[10-3 mm/s]	
1	eau distillée		2.64	0.19	-2.10	0.20
2	1	0	7.80	0.28	-7.93	2.69
3	1	1	6.14	0.35	-	-
4	1	2	5.46	0.11	-5.51	0.49
5	3	0	11.33	0.61	-1.40	1.69
6	3	1	5.30	0.61	0.22	1.80
7	3	2	9.16	0.34	-3.74	0.65
8	3	5	6.11	1.50	-0.16	2.22
9	10	2	6.68	0.36	2.01	1.27
10	10	5	7.89	0.65	-2.91	4.82
11	10	10	10.15	0.38	0.86	0.20
12	10	20	5.51	0.40	-0.67	0.47
13	30	10	10.50	1.07	2.77	2.12
14	30	20	9.58	0.81	0.00	2.27
15	30	40	9.55	0.52	1.10	0.31
16	100	20	9.95	0.56	1.05	1.98
17	100	40	6.18	2.30	0.44	1.00
18	100	80	6.45	0.24	0.48	0.96

Comptage des fentes

Ngaoulé

nombre des fentes	concentration [meq/l]					
	1	3	10	30	100	
SAR	0	-	71			
	1	44	61			
	2	79	61	43		
	5		79	62		
	10			57	72	
	20			59	67	57
	40				60	68
	80					-

Ouro Madiou

nombre des fentes	concentration [meq/l]					
	1	3	10	30	100	
SAR	0	-	-			
	1	-	47			
	2	-	-	50		
	5		34	34		
	10			81	51	
	20			38	56	54
	40				57	56
	80					83

Profils de θ , E_c , θ_{inf} et θ_{sel}

Ngaoulé

	profondeur [cm]	mesures		valeur calculées	
		θ [-]	E_c [mS/cm]	θ_{inf} [-]	θ_{sel} [-]
infiltration	1	0.423	17.180	0.389	0.226
fraction	2	0.357	4.446	0.323	0.055
d'eau saline	3	0.332	1.796	0.288	0.020
1/5	4	0.315	1.406	0.271	0.015
h_0	5	0.293	1.465	0.230	0.014
[cm]	6	0.255	0.865	0.192	0.005
14	7	0.179	0.609	0.099	0.002
	8	0.090	0.636	0.010	0.003
	9	0.084	0.173	-0.014	0.000
infiltration	1	0.413	20.200	0.380	0.266
fraction	2	0.360	3.490	0.327	0.043
d'eau saline	3	0.347	1.271	0.303	0.013
1/5	4	0.340	0.785	0.296	0.006
h_0	5	0.302	0.558	0.239	0.002
[cm]	6	0.196	0.434	0.132	-0.001
2	7	0.105	0.269	0.025	-0.002
	8	0.085	0.188	0.005	-0.003
infiltration	1	0.410	24.500	0.377	0.324
fraction	2	0.359	20.800	0.325	0.274
d'eau saline	3	0.343	12.910	0.299	0.168
1/2	4	0.323	5.630	0.279	0.071
h_0	5	0.317	1.880	0.254	0.020
[cm]	6	0.285	0.787	0.222	0.004
8	7	0.124	0.281	0.044	-0.002
	8	0.099	0.163	0.019	-0.004
infiltration	1	0.372	13.075	0.338	0.171
fraction	2	0.350	2.045	0.316	0.023
d'eau saline	3	0.334	0.776	0.291	0.007
1/5	4	0.318	0.618	0.275	0.004
h_0	5	0.230	0.535	0.167	0.002
[cm]	6	0.127	0.330	0.064	-0.002
8	7	0.085	0.247	0.005	-0.003
	8	0.086	0.205	0.006	-0.003
infiltration	1	0.412	0.213	0.378	
eau	2	0.374	0.285	0.341	
distillée	3	0.369	0.273	0.326	
seulement	4	0.369	0.312	0.325	
h_0	5	0.253	0.417	0.190	
[cm]	6	0.333	0.493	0.270	
8	7	0.239	0.436	0.159	
	8	0.097	0.437	0.017	
	9	0.087	0.209	-0.011	
contrôle	2	0.034	0.547		
sol sec	4	0.044	0.253		
	6	0.063	0.259		
	8	0.080	0.224		
	10	0.098	0.136		

Profils de θ , E_c , θ_{inf} et θ_{sel}

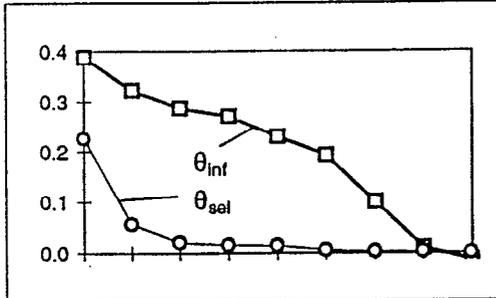
Ouro Madiou

	profondeur [cm]	mesures		valeur calculées	
		θ [-]	E_c [mS/cm]	θ_{inf} [-]	θ_{sel} [-]
infiltration fraction d'eau saline 1/5 h_0 [cm] 14	0.5	0.196	16.960	0.164	0.224
	1	0.350	7.350	0.318	0.094
	1.5	0.338	1.768	0.306	0.019
	2	0.314	0.427	0.282	0.001
	2.5	0.300	0.256	0.263	-0.003
	3	0.198	0.366	0.161	-0.007
	3.5	0.283	0.548	0.246	-0.007
	4	0.270	0.684	0.233	-0.011
	4.5	0.259	1.074	0.222	-0.007
	5	0.239	1.535	0.203	0.010
infiltration fraction d'eau saline 1/5 h_0 [cm] 2	0.5	0.280	15.200	0.248	0.200
	1	0.370	7.770	0.338	0.100
	1.5	0.348	3.000	0.316	0.036
	2	0.325	1.177	0.293	0.011
	2.5	0.317	0.704	0.280	0.003
	3	0.295	0.418	0.258	-0.006
	3.5	0.279	0.404	0.242	-0.009
	4	0.265	0.416	0.229	-0.014
	4.5	0.256	0.717	0.220	-0.012
	5	0.232	1.692	0.195	0.012
infiltration fraction d'eau saline 1/2 h_0 [cm] 8	0.5	0.275	22.200	0.243	0.294
	1	0.347	21.200	0.315	0.279
	1.5	0.314	16.280	0.282	0.213
	2	0.299	10.960	0.267	0.141
	2.5	0.293	5.040	0.256	0.061
	3	0.288	2.070	0.251	0.016
	3.5	0.283	1.152	0.246	0.001
	4	0.264	0.944	0.227	-0.007
	4.5	0.244	1.193	0.207	-0.006
	5	0.231	1.313	0.194	0.007
infiltration fraction d'eau saline 1/5 h_0 [cm] 8	0.5	0.201	15.550	0.169	0.205
	1	0.356	12.740	0.324	0.166
	1.5	0.315	5.630	0.283	0.071
	2	0.304	2.370	0.272	0.027
	2.5	0.296	0.830	0.259	0.004
	3	0.297	0.435	0.260	-0.006
	3.5	0.285	0.438	0.249	-0.008
	4	0.257	0.543	0.220	-0.012
	4.5	0.248	0.808	0.211	-0.011
	5	0.230	1.161	0.193	0.005
infiltration eau distillée seulement h_0 [cm] 8	0.5	0.324	0.267	0.291	
	1	0.318	0.331	0.286	
	1.5	0.296	0.378	0.264	
	2	0.283	0.493	0.251	
	2.5	0.268	0.867	0.231	
	3	0.264	1.060	0.227	
	3.5	0.235	1.480	0.198	
	4	0.188	1.636	0.151	
	4.5	0.089	0.774	0.053	
	5	0.081	0.471	0.044	
contrôle sol sec	2	0.032	0.343		
	4	0.037	0.701		
	6	0.037	0.595		
	8	0.043	0.530		

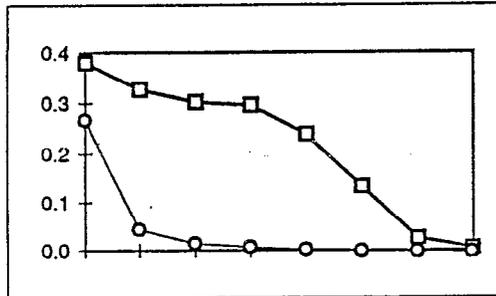
Profils de teneur en eau infiltrée et teneur en solution saline

Ngaoulé

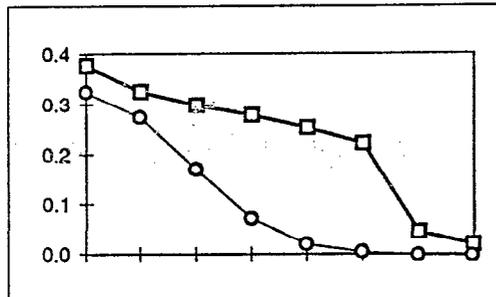
h = 14 cm f = 1/5



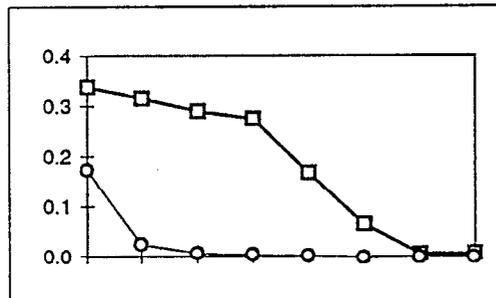
h = 2 cm, f = 1/5



h = 8 cm, f = 1/2

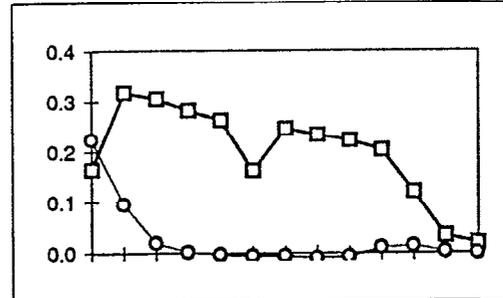


h = 8 cm, f = 1/5

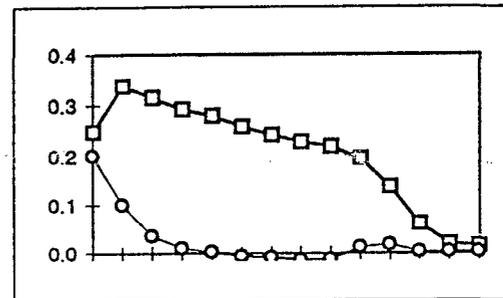


Ouro Madiou

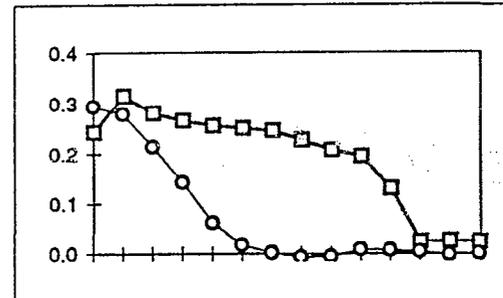
h = 14 cm f = 1/5



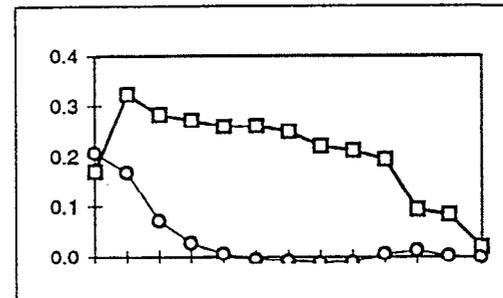
h = 2 cm, f = 1/5



h = 8 cm, f = 1/2



h = 8 cm, f = 1/5



Protocole des simulations

Ngaoulé

198

rapport eau saline 1/5					rapport eau saline 1/5					rapport eau saline 1/5					rapport eau saline 1/2					
h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]		h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]		h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]		h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]		
14	0.2381	45	0.005	0.01	8	0.2513	30	0.005	0.01	2	0.2804	10	0.03	0.05	8	0.345	100	0.2	0.02	
profil réel					profil réel					profil réel					profil réel					
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.245	0.486	0.498	0.505	0.536	0.137	0.140	0.212	0.304	0.372	0.160	0.277	0.331	0.368	0.419	0.845	1.014	0.808	0.788	0.841	
0.090	0.000	0.003	0.057	0.125	0.039	0.000	0.000	0.004	0.028	0.050	0.000	0.001	0.013	0.046	0.520	0.980	0.535	0.510	0.539	
0.064	0.000	0.000	0.000	0.004	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.219	0.900	0.145	0.224	0.277	
0.062	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.060	0.781	0.006	0.040	0.089	
0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.635	0.000	0.002	0.013	
0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.478	0.000	0.000	0.001	

Ouro Madiou

rapport eau saline 1/5				rapport eau saline 1/5				rapport eau saline 1/5				rapport eau saline 1/2			
h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]	h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]	h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]	h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]
14	0.148	55	0.01	8	0.193	57	0.005	2	0.164	45	0.005	8	0.373	140	0.005
profil réel				profil réel				profil réel				profil réel			
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.203	0.892	0.975	1.000	0.425	0.677	0.687	0.695	0.356	0.990	0.915	0.825	0.762	0.892	0.833	0.803
0.007	0.505	0.470	0.499	0.160	0.073	0.161	0.242	0.330	0.106	0.469	0.490	0.543	0.506	0.579	0.581
-0.033	0.081	0.006	0.000	0.027	0.000	0.003	0.020	0.083	0.028	0.001	0.047	0.200	0.217	0.165	0.249
-0.071	0.001	0.000	0.000	-0.035	0.000	0.000	0.000	0.007	-0.060	0.000	0.000	0.027	0.057	0.010	0.046
-0.072	0.000	0.000	0.000	-0.050	0.000	0.000	0.000	0.003	-0.087	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.002
-0.112	0.000	0.000	0.000	-0.075	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.142	0.000	0.000	0.000	-0.026	0.000	0.000

Simulation avec θ_m = 0.2

rapport eau saline 1/5				rapport eau saline 1/5				rapport eau saline 1/5			
h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]	h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]	h0 [cm]	θm	t [min]	D [mm²/s]
14	0.2	55	0.01	8	0.2	57	0.008	8	0.2	45	0.01
profil réel				profil réel				profil réel			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.203	0.643	0.577	0.558	0.425	0.656	0.666	0.657	0.639	0.356	0.730	0.731
0.007	0.192	0.038	0.003	0.160	0.155	0.218	0.265	0.307	0.106	0.208	0.259
-0.033	0.012	0.000	0.000	0.027	0.004	0.017	0.037	0.075	0.028	0.007	0.019
-0.071	0.000	0.000	0.000	-0.035	0.000	0.000	0.001	0.006	-0.060	0.000	0.000
-0.072	0.000	0.000	0.000	-0.050	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.087	0.000	0.000
-0.112	0.000	0.000	0.000	-0.075	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.142	0.000	0.000