

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	5
I. Présentation de la structure d'accueil	6
1. Le département Culture Annuelles et l'équipe REGARD	6
2. Le département Amélioration des Méthodes pour l'Innovation Scientifique et l'équipe SOLEMI	7
II. Présentation du stage, problématique, objectifs	8
1. Contexte agroclimatique et pédologique	8
2. Transformations physico-chimiques et transfert de solutés	9
III. Matériel et méthodes	10
1. Le dispositif colonne	10
A. Généralités sur les colonnes de sol	10
B. Conception du dispositif « colonnes de sol »	11
C. Instrumentation	13
D. Scénarios	14
2. Mesures physico-chimiques réalisées	15
A. Mesure en temps réel sur la colonne	15
B. Analyses de solution prélevée	17
IV. Résultats	19
1. Fonctionnement global du dispositif colonnes	19
2. Analyse des mesures réalisées	20
A. Propriétés physico chimiques du système sol-solution	20
B. Transferts d'eau et de solutés	27
Synthèse et conclusion	34
Conclusion personnelle	35
Bibliographie	36

Table des figures et des tableaux

Figures

- Figure 1** : Le dispositif colonne
Figure 2 : Andosol non perhydraté des Colimaçons
Figure 3 : Schéma simplifié du dispositif colonne de sol instrumenté
Figure 4 : Lisier juste après l'ajout
Figure 5 : Lisier après que la phase liquide est pénétrée
Figure 6 : Centrale d'acquisition Campbell CR10X
Figure 7 : Prélèvement d'eau par une seringue
Figure 8 : Profils de pH au cours des premier et deuxième apports d'eau de 150 mm.
Figure 9 : Profils de concentrations en nitrates au cours des premier et deuxième apports d'eau de 150 mm.
Figure 10 : Evolution des humidités et du flux de drainage en fonction des apports d'eau
Figure 11 : Bilan hydrique des 3 colonnes pour trois plages de dates caractéristiques
Figure 12 : Mesure du débit spécifique en bas de colonne (C1 et C3)
Figure 13 : Profil de densité de l'andosol des Colimaçons
Figure 14 : Coupe d'un étage d'instrument
Figure 15 : Ajustement de la loi d'étalonnage (Hv fit) aux mesures de laboratoire

Tableaux

- Tableau°1** : Ensemble des instruments utilisés sur chaque colonne (répétitions entre parenthèses)
Tableau 2 : Présence (+) ou absence (=) de différences de teneurs en éléments chimiques ou de caractères physico-chimiques entre les deux colonnes ayant reçu du lisier C1 et C2 et la colonne témoin C3, en fonction de la profondeur.
Tableau 3 : Teneur globale de trois espèces chimiques en solution dans les 3 colonnes.
Tableau 4 : Quantités d'azote et de zinc lixivierés (mg j^{-1}) pour différents scénarios d'écoulements et de concentrations
Tableau 5 : Scénario de pluie
Tableau 6 : Analyse du lisier de porc
Tableau 7 : Analyse de l'andosol des Colimaçons
Tableau 8 : Résultat de la colonne 1 (1/2)
Tableau 9 : Résultat de la colonne 1 (2/2)
Tableau 10 : Résultat de la colonne 2 (1/2)
Tableau 11 : Résultat de la colonne 2 (2/2)
Tableau 12 : Résultat de la colonne 3 (1/2)
Tableau 13 : Résultat de la colonne 3 (2/2)

INTRODUCTION

L'agriculture constitue la principale ressource de l'île de La Réunion dont la superficie totale est de 2 512 km². La culture de la canne à sucre représente environ 50 % de la SAU (Surface Agricole Utilisable) principalement dans les zones où les pentes sont les plus faibles. Par contre, les élevages de porcins, de bovins et de volailles se sont essentiellement développés dans les hauts de l'île. Ces exploitations engendrent de nombreux effluents (633 000 tonnes en 2000) qui représentaient plus des ¾ de l'azote des déchets organiques en 1996 (source : Mission de Valorisation Agricole des Déchets). À l'avenir, la législation imposera et contrôlera de plus en plus leur recyclage, qui peut notamment se faire par une valorisation agronomique. Les déchets sont alors épandus dans les champs comme source de matière organique afin de les fertiliser. Ces épandages viennent compléter la matière organique naturelle du sol présente sous forme de matière organique fraîche (débris végétaux, cadavres et excréments d'animaux), composés organiques intermédiaires ou matière organique transitoire et composés organique stabilisés ou finaux (humus). Le pool global de matière organique est réputé accroître la stabilité du sol et lui conférer des propriétés physiques (structure, aération, rétention d'eau), chimiques (dynamique des échanges chimiques) et biologiques (activités des organismes vivants).

Toutefois, le territoire réunionnais subit une urbanisation importante puisque les 706 300 habitants de l'île (en 2002) sont concentrés sur seulement la moitié de sa superficie totale. Les surfaces épandables sont donc relativement réduites et on assiste fréquemment, voire systématiquement, à des apports irraisonnés de la part des agriculteurs qui veulent se débarrasser de leurs déchets. Il est donc nécessaire de préciser, de comprendre et de hiérarchiser les mécanismes responsables des pollutions des sols et des eaux dans un but final de modélisation quantitative, de prévision des risques et de recommandation de dose optimale de produit organique à épandre afin de concilier les intérêts agronomiques et environnementaux.

Cet objectif multiple s'inscrit au cœur des activités de l'équipe REGARD (Risques Environnementaux, Gestion Agronomique, Recyclage des Déchets) du CIRAD à La Réunion qui travaille sur ce sujet en collaboration avec l'équipe SOLEMI (Transfert et disponibilité de l'eau et éléments minéraux dans le sol).

I. Présentation de la structure d'accueil

Le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique (le CIRAD) est né en 1984 de la fusion d'instituts de recherche en sciences agronomiques, vétérinaires, forestières et agroalimentaires dans les régions chaudes. Tous avaient une double vocation : la recherche spécialisée et la coopération scientifique. Aujourd'hui, le CIRAD a pour mission de contribuer au développement rural des pays des régions tropicales et subtropicales par des recherches, des réalisations expérimentales, la formation et l'information scientifiques et techniques. Cette mission peut s'élargir à la prise en compte des enjeux environnementaux et à la gestion des ressources. Les problématiques retenues sont donc l'approche environnementale de l'agriculture intégrée, de l'élevage et de la forêt et la gestion durable des ressources naturelles et de l'environnement dont l'importance n'est plus à démontrer dans le contexte international actuel.

Le CIRAD compte 1800 agents dont 650 dans les DOM TOM et à l'étranger. Son centre névralgique se situe en métropole à Montpellier mais il est présent dans plus de 50 pays et coopère avec plus de 90 pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine. L'Outre-mer français constitue cependant la part la plus importante du CIRAD puisqu'il regroupe 500 agents. Le principe d'action est basé sur le partenariat établi dans le cadre de conventions ou de projets internationaux avec les acteurs de la recherche et du développement (collectivités locales, instituts de recherche, bailleurs de fonds, entreprises, universités...). À l'heure actuelle, le CIRAD concentre 28 programmes d'études répartis dans 7 départements de recherche :

- ♦ Cultures Annuelles (CIRAD-CA)
- ♦ Cultures Pérennes (CIRAD-CP)
- ♦ Productions Fruitières et HORTicoles (CIRAD-FLHOR)
- ♦ Elevage et Médecine Vétérinaire (CIRAD-EMVT)
- ♦ Forêts (CIRAD-FORÉT)
- ♦ Territoires, EnviRonnement et Acteurs (CIRAD-TERA)
- ♦ Amélioration des Méthodes pour l'Innovation Scientifique (CIRAD-AMIS)

A l'occasion de ce stage, j'ai pu travailler avec l'équipe REGARD du département CIRAD-CA à la Réunion et l'équipe SOLEMI du département CIRAD-AMIS à Montpellier.

1. Le département Culture Annuelles et l'équipe REGARD

Le département Cultures Annuelles comprend quatre programmes de recherche, intitulés canne à sucre, coton, cultures alimentaires et gestion des écosystèmes cultivés. Ce dernier vise à développer dans les pays du Sud une agriculture productive, durable et écologiquement ancrée. Un des thèmes développés par ce département concerne l'élaboration de diagnostics des risques, en terme de quantification, de prévention et de traitement des flux de pollutions potentiels pour les eaux et les sols impliqués dans le recyclage agricole des déchets et des effluents. C'est dans ce cadre que le projet REGARD (Risque Environnemental, Gestion Agronomique, Recyclage des Déchets) a été créé à la Réunion.

Ce projet a été programmé pour une durée de cinq ans (2001-2006) et bénéficie des acquis de l'équipe Gdor (Gestion des déchets organiques) dont il poursuit une partie des activités en les élargissant à des thématiques nouvelles. REGARD est positionné, dans le dispositif du CIRAD à la Réunion, au sein du PADEF (Pôle Agriculture Durable Environnement et Forêt). Ce pôle recoupe les compétences de plusieurs départements et permet une meilleure intégration des objectifs des contrats de plan au sein des activités de chacun d'entre eux.

La problématique générale du projet REGARD est l'acceptabilité des déchets par les systèmes agricoles. Pour y répondre, il se propose d'atteindre plusieurs objectifs :

- ♦ identifier des situations et des pratiques à risque par un état des lieux et des connaissances sur les déchets ;
- ♦ comprendre les mécanismes du fonctionnement biologique, physique et chimique des systèmes sol-plante-déchet ;
- ♦ concevoir des systèmes de recyclage agricoles « anti-risques » ;
- ♦ raisonner la gestion des déchets et pratiques agricoles à différentes échelles ;
- ♦ établir des méthodes d'évaluation socio-économique des externalités.

Exemples de projets menés

Pour citer quelques exemples de projets menés par cette équipe, nous pouvons citer l'étude du suivi de l'épandage de vinasses de distillerie ou encore celle concernant la répartition des ETM (Eléments Trace Métallique) à La Réunion dans les sols, les végétaux et les déchets.

2. Le département Amélioration des Méthodes pour l'Innovation Scientifique et l'équipe SOLEMI

Le département d'Amélioration des Méthodes pour l'Innovation Scientifique (CIRAD-AMIS) a pour vocation d'approfondir les connaissances et d'élaborer les méthodes, les outils et les modèles indispensables aux actions de recherche et de développement menées dans les autres départements du CIRAD, qu'ils soient structurés par filière de production ou organisés autour d'une approche territoriale ou régionale. Six programmes sont développés par le CIRAD-AMIS : agroalimentaire, agronomie, biotechnologie et ressources génétiques végétales, économie, politique et marchés, modélisation des plantes, protections des cultures.

Au sein du programme Agronomie, l'équipe SOLEMI a pour mandat de mener différents travaux de recherche et de développement dans le domaine du transfert et de la disponibilité des solutés dans les sols tropicaux. Ils sont appliqués à l'étude des impacts agronomiques (nutrition hydrique et minérale des cultures) et risques environnementaux (dégradation des sols et pollution des eaux) à une échelle locale et dans une perspective d'extrapolation à l'échelle de la parcelle cultivée. L'étude des mécanismes est abordée sous la forme d'approches intégrées du fonctionnement du sol dans lesquels les principaux déterminants, qu'ils soient de nature hydrologique, chimique ou biologique, sont abordés conjointement. Le recours à la modélisation des processus biogéochimiques couplés aux processus de transfert est utilisé le plus souvent comme outil d'analyse de ces mécanismes et de leurs interactions.

Les opérations de recherche portent sur la gestion raisonnée des pratiques agricoles dans différentes situations caractérisées par des contraintes abiotiques majeures, le recyclage agricole de déchets, la mise en œuvre de systèmes de culture innovants, des risques de dégradation de la qualité des sols irrigués ou l'usage de pesticides. Les thématiques de recherche s'intitulent :

- ♦ Mécanismes d'adaptation des plantes aux sols acides,
- ♦ Fonctionnement hydrique et minéral des systèmes de culture,
- ♦ Impact environnemental des pesticides,
- ♦ Salinisation, sodisation et alcalinisation des sols sous irrigation
- ♦ Impact agronomique et environnemental à moyen et long terme du recyclage agricole des déchets sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

Cette dernière thématique est développée dans le cadre d'une ATP (Action Thématique Programmée) CIRAD : « Méthodes d'évaluation de l'impact agronomique et environnemental du recyclage agricole des déchets agro-industriels (2001-2003) » en collaboration notamment avec le programme Palmier (CIRAD-CP) et l'équipe REGARD (CIRAD-CA). La collaboration scientifique avec l'équipe REGARD (GEC/CIRAD-CA) à la Réunion s'articule autour de la thèse de Nicolas PAYET (2001-2004) et, plus récemment, de ce stage (2003), co-encadré par Frédéric FEDER de l'équipe REGARD et Antoine FINDELING de l'équipe SOLEMI.

Exemples de projets menés

L'équipe SOLEMI a notamment travaillé sur la fertilisation raisonnée dans des systèmes de culture avec couverture végétale (SCV) au Brésil ou encore sur l'étude de la dégradation anaérobique de substances fermentescibles dans les sols.

II. Présentation du stage, problématique, objectifs

La présence de déchets dans les sols induit un certain nombre de processus bio-géochimiques encore mal compris et surtout peu étudiés en contexte tropical. Ils sont actuellement l'objet d'une thèse réalisée par Nicolas PAYET (*Évaluation des risques de pollution des nappes par des apports d'effluents dans les sols cultivés de La Réunion*) dans le cadre d'une collaboration entre le CIRAD et l'Université de La Réunion. Désirant compléter leurs connaissances dans ce domaine, les équipes REGARD et SOLEMI ont décidé de mener parallèlement à ce travail une étude en laboratoire qui fait l'objet de ce stage.

Les objectifs de cette étude sont multiples. Dans un premier temps, elle vise à mettre au point une méthode d'observation adaptée aux conditions particulières du milieu tropical. Dans un second temps, il s'agit, suite à un apport de déchet organique à la surface du sol, de préciser les modifications des propriétés physico-chimiques de ce dernier et leur influence sur le transfert des solutés, afin de quantifier une éventuelle pollution du sol en profondeur (nitrate, ETM...).

1. Contexte agroclimatique et pédologique

Le milieu tropical et plus particulièrement l'île de La Réunion présente des caractéristiques qu'il convient dans un premier temps de définir. Tout d'abord, il est bien entendu évident que les cultures réalisées à La Réunion sont adaptées au climat régnant sous ces latitudes. Nous allons pouvoir ainsi retrouver des cultures de canne à sucre, mais aussi de vanille, d'essences à parfum (vétiver, géranium...), fourragères (maïs, fourrage...), de fruits (mangues, letchis...).

D'un point de vue climatique, les deux traits dominants sont un régime d'alizés (vent d'est dominant) pendant l'hiver austral et la présence plus irrégulière de cyclones tropicaux parfois violents pendant l'été. Ceux-ci sont à l'origine de plusieurs records mondiaux de pluviométrie. L'inégale répartition temporelle des pluies permet de distinguer deux saisons :

- ♦ une saison fraîche et sèche, de mai à octobre (1/3 des pluies) ;
- ♦ une saison chaude et humide, de novembre à avril (2/3 restant).

La saison cyclonique, qui s'étale de décembre à mars, représente à elle seule 60 à 70 % des pluies annuelles.

La Réunion est une île volcanique. Le volcan à l'origine de sa formation est le Piton des Neiges situé à l'intérieur de l'île et qui culmine à 3 069 m. Il est aujourd'hui inactif et l'activité volcanique se concentre au Sud de l'île autour du Piton de La Fournaise (2 631 m). Sur l'ensemble de l'île, la roche mère est essentiellement constituée de coulées basaltiques peu altérées et le plus souvent fissurées. Ce type de matériau, tout comme les niveaux scoriacés, possède des perméabilités très élevées. Etant donnée l'intensité des pluies atteignant La Réunion, nous pouvons observer des flux d'eau gravitaire très important jusqu'à la nappe de base. Cette nappe est elle-même située très profondément. En effet, il n'y a pas de réelle couche imperméable. La nappe se situera donc, en général, quasiment au niveau de la mer même lorsque la couche de sol la surmontant atteint plusieurs centaines de mètres.

A cause de la diversité des laves émises, du climat, du relief et de la végétation, nous allons trouver à La Réunion de nombreuses unités pédologiques. Pour cette expérimentation, nous avons choisi de travailler sur un andosol non perhydraté de la côte sous le vent, prélevé sur le site des Colimaçons situé à 780 m d'altitude dans les hauts de la commune de Saint Leu. La température moyenne annuelle y est de 18,8°C et les précipitations de 1 280 mm par an. La roche mère y est composée de projections tuffo-cendreuse car, à La Réunion, les andosols sont rarement formés sur des coulées basaltiques massives. Ils sont présents en général à plus de 600 m d'altitude et sous plus de 1 500 mm de pluviométrie annuel. Nous pouvons classer les andosols en deux sous-classes :

- ♦ les andosols allophaniques (ou andosols *sensu stricto*) issus d'un processus d'hydrolyse à partir de matériaux pyroplastiques. Ils sont riches en allophanes, particules floconneuses très riches en eau. Cette sous-classe comprend :
 - les andosols vitriques, peu évolués et à propriété de sable volcanique. Leurs facteurs limitants sont d'ordre physique : profondeur restreinte, fort drainage et faible rétention d'eau. Ceci aura pour conséquence de présenter un risque de lixiviation rapide de certains éléments chimiques, dont l'azote.
 - les andosols saturés, très fertiles et supportant un usage agricole intensif.
 - les andosols désaturés, comprenant les andosols non perhydratés (en général le sol des Colimaçons) et les andosols perhydratés.
- ♦ les andosols non allophaniques ou para-andosols issus d'un processus d'acido-complexolyse modéré. Ce sont des sols peu fertiles.

Les andosols réunionnais sont acides. Le pH_{eau} est en général de 5,3 à 6,4 en surface et de 5,8 à 6,2 en profondeur. Ce pH faible peut rendre possible la présence d'aluminium échangeable, toxique pour les plantes cultivées. Des amendements à la chaux sont parfois nécessaires pour relever le pH au dessus de 5. Cependant, les andosols ont un fort pouvoir tampon, c'est-à-dire qu'ils résistent à la remontée du pH ; les faibles doses de chaux sont donc souvent inefficaces.

Leur conductivité électrique est comprise entre 30 et 85 mS/cm.

2. Transformations physico-chimiques et transfert de solutés

L'intérêt principal de ce stage est d'évaluer les conséquences environnementales liées à l'épandage d'un déchet organique. De nombreuses études sont menées sur ce sujet notamment en métropole (de Cockborne *et al.*, 2001 ; de Cockborne *et al.*, 2002). La minéralisation d'un déchet est susceptible d'influencer la mobilité et la concentration de certains composés chimiques potentiellement polluants pour les eaux et les sols. Les propriétés du sol, mais également les conditions hydriques, la nature du déchet et du système de culture sont des paramètres essentiels affectant les processus associés à une éventuelle pollution.

Pour comprendre ces transformations du milieu, nous suivrons à la fois des paramètres chimiques (pH, Eh, O₂, conductivité électrique, température) mais également physiques (humidité, potentiels hydrique de l'eau dans le sol). Ces dernières mesures nous permettront de préciser les flux hydriques. Une partie des analyses chimiques seront réalisées sur place (nitrate, fer et alcalinités) ; d'autres éléments (chlorure, sulfate, calcium, magnésium, sodium, potassium, phosphore, silicium, aluminium, manganèse, titane, cuivre, zinc) seront dosés par le laboratoire d'analyse du CIRAD à Montpellier afin d'établir des bilans géochimiques.

Le déchet que nous avons choisi d'utiliser est un lisier de porc. En effet, la filière porcine est bien implantée à La Réunion et produit chaque année 228 575 m³ de lisier soit 11 428 tonnes de matière sèche. C'est le premier gisement animal en volume brut (46 % au total) et en azote (40 % du total), mais le troisième en tonnage de matière sèche (16 % au total). Ceci est dû à la teneur élevée du lisier en eau. L'épandage correctement réalisé est le meilleur moyen technique et économique de valorisation.

Le suivi des paramètres sera réalisé au laboratoire sur un dispositif expérimental constitué de colonnes de sol reconstituant les horizons de l'andosol non perhydraté des Colimaçons et sur lesquelles sera épandu du lisier de porc. Dans la partie "Matériel et méthodes", nous exposons maintenant le principe du dispositif, son instrumentation, les scénarios d'alimentation en eau et en lisier, ainsi que les mesures et les prélèvements associés.

III. Matériel et méthodes

1. Le dispositif colonne

A. Généralités sur les colonnes de sol

Un dispositif de colonnes de sol reproduit au laboratoire les conditions rencontrées *in situ* en les simplifiant. Sur le terrain, l'hétérogénéité du sol, la variation des conditions climatiques et d'autres paramètres extérieurs rendent la visualisation et l'interprétation de certains phénomènes difficiles. Les expérimentations réalisées sur colonnes ont pour but de contrôler ces conditions afin de faciliter la compréhension des différents phénomènes. De plus, le suivi des différents paramètres par des instruments de mesures est plus facile techniquement et moins coûteux à réaliser sur des colonnes que sur le terrain. Enfin, nous pouvons facilement réaliser plusieurs répétitions alors que cela nécessite beaucoup d'espace sur le terrain. Précisons tout de même que le travail sur colonne comporte des limites. En effet, la simplification du système et son artificialisation ne permettent pas une extrapolation immédiate au terrain. En outre, les transferts horizontaux ne sont pas ou très peu pris en compte dans les colonnes.

Le travail sur colonne peut s'effectuer de deux façons différentes :

- ♦ sol non remanié : il faut enfonce le tube de PVC (sans la base) dans le sol jusqu'à la profondeur souhaitée puis le retirer avec le sol qui est à l'intérieur.
- ♦ sol remanié : les différents horizons du sol sont prélevés séparément sur le terrain. Une fois ramené au laboratoire, le sol est tamisé (5 mm) pour le rendre plus homogène et plus facile à replacer à l'intérieur des colonnes. Cela permet de limiter les hétérogénéités entre les colonnes. Le sol est ensuite introduit dans les colonnes en respectant les différents horizons et en le recompactant à la densité mesurée sur le terrain.

B. Conception du dispositif « colonnes de sol » (Figure 1)



Figure 1 : Le dispositif colonne

Dans ce travail, une colonne est composée de deux parties :

- ♦ un tube de PVC de 110 cm de long et de 40 cm de diamètre
- ♦ une plaque de plexiglas qui ferme la colonne à la base

Cette plaque présente une légère pente qui dirige l'eau vers un exutoire percé dans la plaque afin d'éviter qu'elle ne stagne en bas de colonne. Au fond de la colonne, sur la plaque de plexiglas, nous avons placé un géotextile pour éviter que la terre ne bouche l'exutoire.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de travailler en remaniant notre andosol non perhydraté des Colimaçons (Figure 2 page suivante). Cet andosol est meuble et sa pierrosité est quasiment nulle. Des tufs et des reliquats de basaltes y sont observés dans un profil constitué de trois horizons successifs :

- ♦ L'horizon A (0 à 40 cm) présente une couleur brun foncé. Il est riche en matières organiques et sa structure est caractérisée par des agrégats grumeleux en surface, cohérents et frais. Sa texture est limono-sableuse. Aux Colimaçons, l'horizon A est un peu plus épais qu'à l'état naturel sur l'île (environ 25 cm), suite au terrassement des parcelles.
- ♦ L'horizon d'altération S (40 à 150 cm). Il est de couleur brun jaune. Sa texture est constituée à plus de 50 % de particules inférieures à 2 mm.
- ♦ L'horizon C est constitué soit d'une alternance de lits cendreux indurés (tufs), soit d'un mélange de cendres en voie d'altération et de basaltes.



Figure 2 : Andosol non perhydraté des Colimaçons

Nous avons choisi de travailler jusqu'à une profondeur de 1 mètre. A cette profondeur, les racines des plantes commencent à se raréfier et les solutés présentent, donc, un réel risque de transfert vers la nappe, puisqu'ils ne pourront plus être prélevés par les plantes. Nous avons reconstitué dans les colonnes l'horizon A (de 0 à 40 cm de profondeur) et l'horizon S (de 40 à 100 cm de profondeur). En observant le profil de densité du sol des Colimaçons (ANNEXE 1), nous avons choisi de reconstituer l'horizon A en deux couches : 0 – 20 cm de densité moyenne d'environ 0,90 et 20 – 40 cm de densité moyenne de 0,80. L'horizon S possède une densité relativement homogène d'environ 0,85 en moyenne. Trois couches de sol seront donc prélevées et reconstituées séparément dans les colonnes. Au total, trois colonnes ont été réalisées, deux d'entre elles recevront du lisier (C1 et C2) et la troisième servira de témoin (C3) (Figure 3). Le lisier de porc est un mélange de féces et d'urine. Il a une forte charge organique et une composition variable en fonction du type d'alimentation, de la digestibilité des produits ingérés. Le pH varie entre 7,2 et 8,2 et la matière organique représente 40 à 69 % de la matière sèche. Sa valeur agronomique est fonction des conditions de stockage et d'épandage. Il peut y avoir jusqu'à 50 % de perte d'azote par volatilisation.

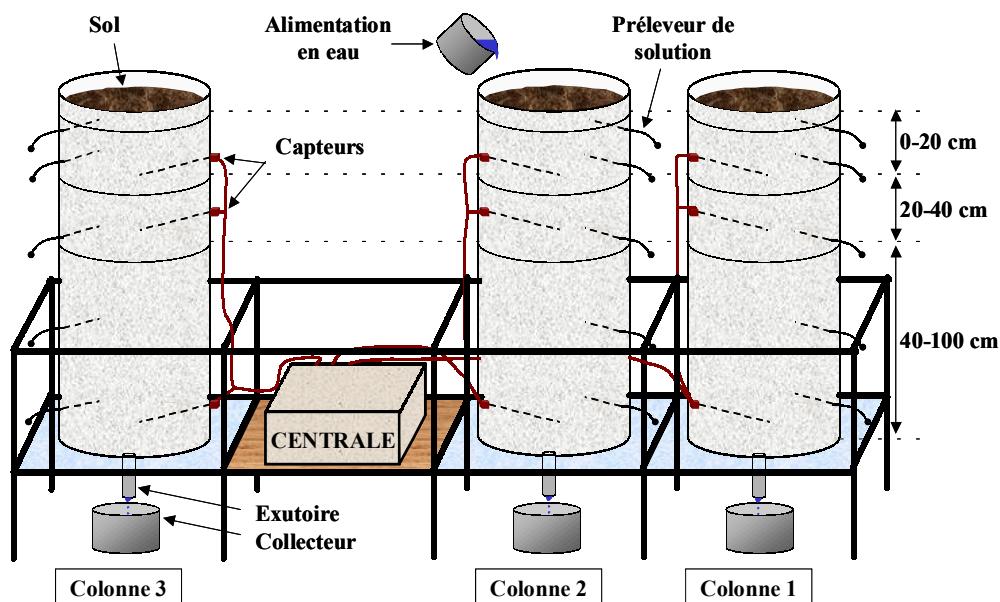


Figure 3 : Schéma simplifié du dispositif colonne de sol instrumenté

C. Instrumentation

L'instrumentation de la colonne a pour but de suivre en temps réel l'évolution des différents paramètres du sol et de sa solution. De plus, l'automatisation des mesures par branchement sur une centrale d'acquisition permet d'obtenir des mesures à cadence régulière sur des pas de temps courts (10 minutes). Cependant, certains paramètres chimiques ne peuvent pas être suivis de cette manière, c'est pourquoi l'instrumentation comprend également un système permettant de prélever de l'eau à différents niveaux de la colonne dans le but de réaliser des dosages chimiques en laboratoire. Les paramètres qui ont été mesurés automatiquement sur la colonne sont : l'humidité, le potentiel hydrique, les vitesses de flux, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction (Eh), et la température. Pour cela, nous avons équipé chaque colonne de sol d'un certain nombre de capteurs présentés dans le Tableau 1. Le nombre important de capteurs et leur taille a conditionné le diamètre relativement important de nos colonnes (40 cm). Ce diamètre a également permis de minimiser les perturbations d'écoulement de l'eau induites par la présence des capteurs à l'intérieur de la colonne et de limiter les effets de bord (écoulement préférentiel le long de la paroi du tube en PVC).

	Paramètres	Capteurs	Localisation
Paramètres physiques	Humidité	Sondes TDR	15, 35 et 95 cm
	Potentiel hydrique	Microtensiomètres + boîtier WIND	15, 35 et 95 cm
	Vitesse de flux	Electrodes impolarisables	15, 35 et 95 cm
	Débit de drainage	Pluviographe	Base de colonne
	Température	Thermocouples	15, 35 et 95 cm
Paramètres chimiques	pH	Electrodes pH	15, 35 et 95 cm
	Eh	Electrodes Eh	15, 35 et 95 cm
	Prélèvement de solution	Rhizons	7,5 (2), 15 (2), 35 (2) et 95 (2) cm

Tableau°1 : Ensemble des instruments utilisés sur chaque colonne (répétitions entre parenthèses)

Les instruments ont été placés dans la colonne à 3 niveaux proches de la base de chaque horizon. Afin de faciliter l'interprétation des différents résultats, nous avons privilégié l'installation à chaque niveau de tous les capteurs (mesures automatiques et prélèvements). L'un des intérêts est, notamment de comparer pour certains paramètres chimiques (pH et Eh), les mesures effectuées en direct et celles réalisées sur la solution prélevée. Nous placerons donc les capteurs à 15 cm, 35 cm et 95 cm. Cette instrumentation est toutefois complétée par des rhizons supplémentaires placés à 7,5 cm de profondeur. En effet, se sont les premiers centimètres de sol qui sont les plus intéressants à suivre car les processus de transformations chimiques risquent d'y être les plus intenses. De même, les eaux de drainage ont été recueillies à la base de chaque colonne. Elles permettent de faire un bilan hydrique complet en fin d'expérimentation, mais aussi, par comparaison avec la solution prélevée par les rhizons à 95 cm, d'évaluer l'influence de ces capteurs sur les prélèvements. Enfin, un pluviographe relié à la centrale d'acquisition a été placé à la base de C1 et C3, pour enregistrer les débits de drainage.

Une coupe en ANNEXE 2 présente la manière dont les instruments sont répartis sur un étage.

D. Scénarios

a. Régime d'alimentation en eau

Le transfert d'un polluant jusqu'à une nappe d'eau se fait par convection. C'est lors des pluies que le risque de pollution est donc le plus important. Nous avons effectué des ajouts d'eau à la surface de la colonne pour simuler des pluies. Les apports d'eau ont été dimensionnés en fonction des données pluviométriques typique de La Réunion (Chopart et Mézino, 2003). Notre attention s'est particulièrement portée sur la période de décembre à mars où les pluies sont les plus fortes. De petits apports de 10 mm correspondant à une pluie moyenne journalière ont été définis. De même, nous avons déterminé des apports d'eau de 150 mm correspondant à une pluie cyclonique. Un autre point important que nous avons considéré pour calculer ces ajouts est qu'il faut un potentiel hydrique suffisamment proche de la saturation pour pouvoir prélever de la solution dans le sol. Nous avons donc effectué des essais sur une colonne test avant de valider les quantités d'eau à apporter. Les apports se font en une seule fois par versement du volume nécessaire en haut de colonne en ayant pris soin au préalable de protéger la surface du sol pour ne pas l'altérer.

Le scénario de pluie élaboré se décompose en quatre phases (ANNEXE 3) :

- ♦ une phase de drainage du 18/06 au 24/06 (7 jours), avant l'ajout de lisier, consistant en de gros apports d'eau,
- ♦ une phase de ressuyage du 25/06 au 01/07 pour permettre au régime hydrique du sol de se stabiliser
- ♦ un scénario humide du 02/07 au 16/07 (14 jours), débutant par l'ajout de lisier, où des apports d'eau modérés seront effectués quotidiennement avant un apport final extrême,
- ♦ une nouvelle phase de ressuyage du 17/07 au 20/07 (4 jours) entre les deux scénarios,
- ♦ un scénario plus sec du 21/07 au 30/07 (10 jours) où des apports quotidiens modérés seront entrecoupés d'une période sèche de quelques jours avant un apport final extrême.

La phase de drainage a pour but de réhumecter le sol séché avant le tamisage et de le lessiver. Ce lessivage permet de « nettoyer » la colonne. En effet, l'oxygénéation du sol lors du tamisage relance les processus de minéralisation qui peuvent, par exemple, entraîner une formation artificielle de nitrate. Il s'agit donc d'éliminer ce surplus ainsi que d'éventuels éléments qui pourrait avoir été accidentellement introduits dans les colonnes lors de leur conception.

b. Epandage du lisier

Le lisier est un produit de composition naturellement très variable. Le déchet utilisé pour l'ajout a été prélevé quelques jours avant l'épandage dans la fosse d'un éleveur. Pour que les quantités épandues correspondent à un impact significatif sur le sol en terme d'apport azoté, nous avons effectué une mesure préliminaire au Quantofix qui permet d'estimer la quantité d'ammonium. Une mesure de nitrate était aussi initialement prévue mais elle n'a pu être réalisées (problèmes avec l'électrode à nitrate). Cependant, le Eh du lisier est inférieur à 0 et dans ces conditions anoxiques, il se produit des processus de dénitrification qui élimine les nitrates s'ils sont présents. Il est donc très rare d'observer des nitrates dans un lisier car il faut une bonne oxygénéation pour conduire à leur formation, ce qui n'est pas le cas dans les fosses. Nous considérerons qu'il n'y a pas de nitrate dans notre déchet. L'analyse de l'azote et du carbone organique n'a pas été réalisée. A défaut, Nous estimerons l'azote organique en considérant que notre lisier est moyennement évolué (séjour en fosse de quelques semaines). A ce stade, l'azote organique représente approximativement 50% de l'azote total, le reste étant essentiellement sous forme d'ammonium. Ce dernier ayant été mesuré à 1,7 g/l, nous considérerons que la quantité d'azote organique est elle aussi de 1,7 g/l. La quantité d'azote totale est alors estimée à 3,4 g/l ce qui paraît normale pour un lisier (Farinet, communication personnelle). L'analyse complète du lisier est présentée en ANNEXE 4.

Pour définir la quantité à épandre, nous nous sommes basés sur les pratiques agronomiques locales qui consistent à épandre 60 m^3 de lisier par hectare, ce qui correspond à environ 220 kg ha^{-1} d'azote pour notre lisier. Nous avons volontairement forcé cette dose en apportant 300 kg ha^{-1} d'azote car c'est ce genre de situation à risque que nous souhaitons observer. En comparaison avec les teneurs en azote de notre sol, nous effectuons un ajout environ deux fois supérieur à la quantité d'azote contenue dans l'horizon 0-20 cm, 4,5 fois supérieur à celle de l'horizon 40-60 cm et 6 fois à celle de l'horizon 80-100cm. (ANNEXE 5). Un ajout de lisier de 2 litres (Figures 4 et 5) a été réalisé le 02 juillet en procédant de la même manière que pour les ajouts d'eaux (sol protégé). Pour compenser le volume d'eau introduit sur les colonnes C1 et C2, 1,8 l d'eau a été ajouté dans la colonne témoin (C3).



Figure 4: Lisier juste après l'ajout



Figure 5 : Lisier après que la phase liquide est pénétrée

2. Mesures physico-chimiques réalisées

A. Mesure en temps réel sur la colonne

Les mesures réalisées en temps réel sur les colonnes de sol sont enregistrées au moyen d'une centrale d'acquisition Campbell CR10X (Figure 6 page suivante). Etant donné le nombre important de capteur installé sur les colonnes, nous avons dû utiliser deux multiplexeurs Campbell AM16/32. Chaque multiplexeur permet d'acquérir par séquençage jusqu'à 32 mesures bipolaires en ne mobilisant que 2 des 6 voies de la centrale. La centrale et les multiplexeurs sont pilotés par un programme que nous avons écrit sous Edlog (module du logiciel PC208w) et qui détermine la manière dont sont acquises et consignées les mesures. Les mesures sont réalisées toutes les dix secondes sur l'ensemble des capteurs pour pouvoir suivre par monitorage leur évolution. Elles ne sont stockées dans la mémoire de la centrale que toutes les 10 minutes pour limiter le volume des données. Les données sont ensuite téléchargées de la centrale vers un ordinateur. La centrale n'enregistre pas directement les paramètres que nous voulons étudier mais des signaux bruts (tensions, périodes,...) des capteurs. Il faut donc convertir ces signaux en utilisant une loi d'étalonnage pour chaque capteur. Nous présentons maintenant brièvement les protocoles et instruments utilisés pour les différentes mesures réalisées.



Figure 6 : Centrale d'acquisition Campbell CR10X

a. pH

Le pH est défini par le logarithme de l'activité des ions (H_3O^+) : $\text{pH} = \text{Log} a(\text{H}_3\text{O}^+)$
 Deux types d'électrodes pH ont été utilisées dans le cadre de ce travail :

- ♦ une électrode combinée où la différence de potentiel, fonction linéaire du pH, est mesurée entre une électrode de travail en verre et une électrode de référence ($\text{Ag}/\text{AgCl}-\text{KCl}$ saturé) ;
- ♦ une électrode ISFET où l'électrode de travail est remplacée par un capteur transistor à effet de champ sensible aux ions (uniquement pour les mesures sur la colonne).

b. Eh

Le potentiel d'oxydo-réduction représente l'activité des électrons en solution correspondant à l'ensemble des couples oxydo-réducteurs présents. Pour effectuer les mesures nous avons utilisé une électrode combinée qui présente une électrode de travail en platine et une référence $\text{Ag}/\text{AgCl}-\text{KCl}$ saturé. Par convention les valeurs des potentiels redox doivent être ramenées à l'électrode normale à hydrogène (dont le potentiel a été défini comme égale à 0) grâce à la formule :

$$\text{Eh}_{\text{ENH}} = \text{Eh}_{\text{Ag/AgCl}} + 0,197 \quad \text{en Volt}$$

Normalement, il faut aussi faire une correction de température pour ramener la mesure à une valeur de référence de 25°C. Cette correction se fait selon la formule :

$$\text{Eh}_{\text{solution à 25°C}} = \text{Eh}_{\text{à la temp t}} + 0,00076 (t - 25) \quad \text{en Volt}$$

Dans notre cas, les mesures ont été réalisées à des températures relativement proches de 25°C, nous n'avons donc pas tenu compte de cette correction.

c. Humidité

L'humidité est définie comme le volume d'eau présent dans le sol par unité de volume de sol (humidité volumique). Les sondes TDR (*Time domain Reflectometry* -- Réflectométrie dans le Domaine Temporel) de type CS616 permettent de mesurer la teneur en eau volumique d'un milieu poreux par une méthode basée sur la mesure des temps de propagation/réflexion d'une onde électromagnétique. La sonde est composée de deux tiges d'acier inoxydable de 30 cm de long connectées à un câble coaxial. Ces tiges activées de façon différentielle, forme une ligne de transmission d'onde dont la vitesse de propagation varie en fonction de la constante diélectrique du milieu qui les entourent. La permittivité diélectrique de l'eau étant largement plus importante que celle des autres constituants du sol, cette mesure est particulièrement sensible à la teneur en eau du sol. Un étalonnage demeure nécessaire pour transformer la constante diélectrique mesurée en humidité du sol.

d. Potentiel hydrique

Le potentiel hydrique est défini comme la quantité d'énergie à fournir pour extraire un volume unitaire d'eau du sol. Les microtensiomètres (céramiques poreuses) insérés dans la colonne sont reliés au boîtier de WIND par des tubes parfaitement remplis d'eau dégazée. Le dégazage de l'eau permet que la tension s'exerçant au niveau du contact sol-céramique poreuse soit exactement transmise au capteur de pression dans le boîtier WIND. Les capteurs sont alimentés en 5V stabilisé (alimentation TRACO), ainsi la tension mesurée en sortie du capteur est proportionnelle à la valeur de la dépression exercée par l'eau sur celui-ci.

e. Température

Les thermocouples sont constitués de deux conducteurs en métaux de caractéristiques différentes soudés à leur extrémité (jonction de mesure insérée dans la colonne). L'autre extrémité de chaque conducteur est reliée à la centrale individuellement (jonctions de référence). La présence d'un gradient thermique dans un conducteur électrique génère une force électromotrice (fém) dans cette zone. Son amplitude dépend du matériau dont le conducteur est composé ainsi que du gradient de température. La jonction de référence est maintenue à une température fixe et connue. Le différentiel de température entre la jonction de mesure et la jonction de référence est proportionnel à la fém du thermocouple. Pour chaque combinaison de thermocouple, il existe des tables de correspondances qui établissent précisément le rapport entre la tension de sortie et la température du couple.

f. Potentiel Spontané

Des sondes impolarisables Pb/PbCl₂ (SDEC, France) ont été utilisées pour mesurer les potentiels spontanés apparaissant dans le sol lors du transfert d'eau dans sa structure poreuse. L'utilisation de ces sondes n'étant qu'à un stade expérimental, les résultats ne seront pas présentés dans ce rapport.

B. Analyses de solution prélevée

Pour effectuer les prélèvements de solution, nous avons utilisé des préleveurs de type rhizon, qui produisent beaucoup moins de perturbation sur les écoulements que des plaques lysimétriques. Le préleveur rhizon consiste en une partie poreuse (polymère poreux) de 10 cm de long introduit dans la colonne et à l'intérieur de laquelle se trouve une fine tige en acier INOX qui rigidifie l'ensemble. Cette partie est connectée à un tube qui possède à son autre extrémité un système permettant de visser une seringue hypodermique. L'eau est alors prélevée directement en maintenant la seringue en aspiration (Figure 7). La vitesse de prélèvement dépend du potentiel hydrique du sol. Si celui-ci est trop faible, l'eau ne pourra pas être prélevée. L'eau a également été recueillie à la base de la colonne par simple écoulement gravitaire.

En plus des prélèvements effectués pour les analyses, deux aliquotes de 20 ml ont été envoyés à Montpellier lors de chaque prélèvement. L'un a été acidifié avec de l'acide chlorhydrique, l'autre non car certains éléments pourraient être altérés par l'ajout d'acide. Ces aliquotes ont été conservés en chambre froide jusqu'à leur envoi à Montpellier. Concernant les analyses réalisées à la Réunion, un certain nombre de précautions ont été prises. La solution prélevée sur les colonnes devait être analysée rapidement et dans des récipients relativement étanches afin de limiter le contact avec l'air qui est susceptible de modifier certains paramètres (O₂ et Eh notamment). Les mesures ont été réalisées sur des échantillons de solution d'environ 20 ml (sauf pour le Fer) et celle de pH, nitrate et d'alcalinité ont été effectués sous agitation pour homogénéiser la solution. Nous présentons maintenant brièvement les instruments utilisés pour les différentes mesures réalisées ainsi que certains protocoles spécifiques.

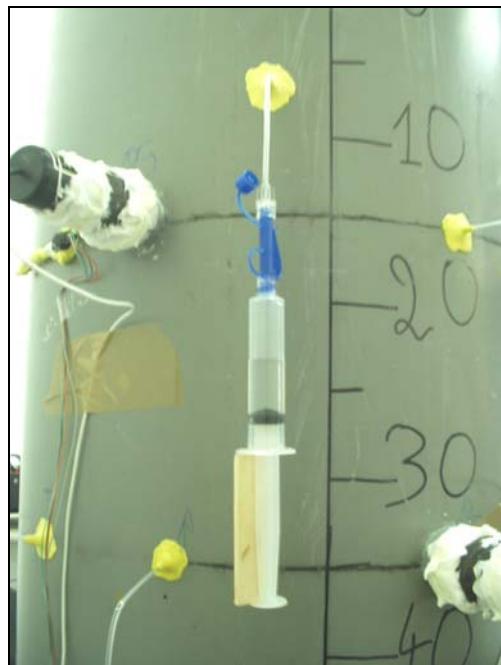


Figure 7 : Prélèvement d'eau par une seringue

a. pH et Eh

Nous avons utilisé, pour réaliser ces mesures, un matériel identique à celui ayant servi à effectuer les mesures en direct sur la colonne (voir paragraphe III.2.A.a et b).

b. Oxygène dissous

La mesure de l'oxygène dissous est réalisée grâce à un capteur polarographique de type clark qui engendre un courant proportionnel à la pression partielle de l'oxygène dans la solution. L'appareil de mesure effectue une correction automatique de la température (température de référence : 25°C).

c. Conductivité Electrique

La conductivité nous permet d'évaluer la quantité d'ions en solution. La mesure standardisée correspond à la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. L'appareil de mesure effectue une correction automatique de la valeur mesurée (température de référence : 25°C).

d. Alcalinité

L'alcalinité totale d'une solution est la somme en équivalents des bases titrables par un acide fort. Nous pouvons la séparer en deux :

- ♦ l'alcalinité carbonatée due aux ions carbonates et bicarbonates,
- ♦ l'alcalinité non carbonatée due aux autres espèces chimiques à propriétés basiques (ions hydroxylé, acide organique faible,...).

Nous avons procédé aux mesures de l'alcalinité totale et de l'alcalinité non carbonatée. La mesure de l'alcalinité totale se fait par titration de la solution à analyser par de l'acide chlorhydrique (0,25 N). Nous faisons ensuite buller de l'azote dans la solution afin d'éliminer le CO₂ formé par la réaction entre l'acide et les carbonates. Il ne reste alors en solution que les espèces correspondant à l'alcalinité non carbonatée. Nous effectuons alors une titration retour avec de la soude (0,25 N) qui nous permet de déterminer l'alcalinité non carbonatée.

f. Nitrate

La mesure de nitrate est effectuée grâce à une électrode sélective au nitrate. L'élément de référence (Ag / AgCl) est en contact avec un élément nitrate interne à l'électrode. L'élément de travail est constitué d'une membrane sélective des ions nitrates siège d'échange d'ions nitrates avec l'échantillon. Cependant, la mesure réalisée par l'électrode correspond en réalité à l'activité de l'ion nitrate et non à sa concentration. Or, cette activité est réduite si la force ionique de la solution est faible car les mouvements d'ions sont réduits. Dans notre cas, nous effectuerons une dilution 1:1 des échantillons à analyser avec un tampon de force ionique (KH₂PO₄) pour augmenter la force ionique de la solution. Il faut aussi faire attention aux perturbations qui peuvent être induites par la présence en concentration importante de certains éléments comme par exemple les chlorures. Lors de la réalisation des mesures, les échantillons ont été placés dans un bain afin d'homogénéiser la température de l'ensemble des échantillons.

g. Fe²⁺

Des mesures colorimétriques de fer II ont été réalisées par complexation avec du DPKBH (di-2 pyridyl cétone benzohydrazone) en suivant la procédure de Pehkonen *et al.* (1992).

IV. Résultats

1. Fonctionnement global du dispositif colonnes

Notre premier objectif était de réaliser un dispositif adapté aux conditions particulières du milieu tropical : travail sur andosol, élaboration et mise en œuvre d'un scénario de pluie vraisemblable et calcul d'une dose adaptée de lisier à épandre. Cet objectif est en grande partie rempli même si certains problèmes techniques ont été rencontrés au cours de la réalisation des colonnes. A titre d'exemple, lors des grosses pluies le sol était quasiment à saturation et des fuites ont été observées lors de tests préliminaires à la jonction entre la plaque de base et la colonne ainsi qu'au niveau des capteurs. Après de longs tâtonnements et de nombreux échecs, nous avons finalement éliminé ce dysfonctionnement par l'emploi de joint silicone. Par ailleurs, le système de pente permettant l'écoulement de l'eau à la base de la colonne a été le fruit d'une longue réflexion et de nombreux tests.

Le pilotage de la chaîne automatique d'acquisition (centrale-multiplexeur-capteur) par un programme – adapté au nombre et genre de capteurs dont nous avons équipé la colonne – a été un succès. Certains des capteurs utilisés ont été commandés pour l'occasion. C'est le cas des électrodes pH amplifiées indispensables car le branchement d'une électrode non amplifiée est techniquement incompatible avec le mode de mesure basse impédance de la centrale Campbell. Enfin, la mesure du potentiel hydrique a fait l'objet de la création, par la société SDEC, d'un boîtier WIND prototype permettant de connecter simultanément 10 microtensiomètres.

Les colonnes ont dans l'ensemble bien fonctionné et nous avons pu collecter la quasi-totalité des paramètres que nous voulions observer. Seules les mesures de potentiel hydrique ont été un échec. En effet, le signal des tensiomètres que nous avons enregistré correspond à un bruit de fond et nous ne nous sommes aperçus de ce dysfonctionnement qu'en fin d'expérimentation. Ce problème pourrait être dû à l'absence de résistances qu'il aurait fallu souder à l'intérieur du boîtier WIND et devrait être résolu rapidement. Nous détaillons dans la section qui suit les résultats des mesures effectuées.

D'un point de vue des mesures chimiques, il nous manque quelques résultats. Des problèmes ont été rencontrés avec l'électrode nitrate, ainsi les analyses du lisier et des prélèvements des deux premiers jours ne sont pas exploitables. Par la suite, l'électrode a été reconditionnée et les mesures ont pu être effectuées normalement. De même, nous n'avons pas d'analyse du carbone et de l'azote organique sur l'ensemble des prélèvements et nous n'avons pas eu le temps de finir de traiter les mesures d'alcalinité. Finalement, un nombre important de mesures a été réalisé par la centrale et sur les prélèvements (sur place et au laboratoire de Montpellier). Ces résultats sont présentés dans la partie suivante.

2. Analyse des mesures réalisées

Pour répondre au deuxième objectif de ce travail nous analysons dans un premier temps les modifications des propriétés physico-chimiques du sol et de sa solution après apport de lisier. Nous abordons ensuite l'influence de ses modifications sur les transferts de solutés et l'éventuelle pollution qui peut en découler. L'ensemble des résultats est présenté en ANNEXE 6 (Colonne 1), en ANNEXE 7 (Colonne 2) et en ANNEXE 8 (Colonne 3).

A. Propriétés physico chimiques du système sol-solution

Pour présenter les principaux résultats géochimiques, nous avons choisi de focaliser notre analyse sur les résultats des deux pluies de 150 mm et les différences observées entre les aliquotes prélevées à 95 cm de profondeur par les rhizones et les aliquotes récupérées à l'exutoire de la colonne à 100 cm.

a. Premier apport d'eau de 150 mm (15 juillet 2003)

Les valeurs de pH (Figure 8 page suivante) mesurées à 7,5 et 15 cm de profondeur varient entre 4,75 et 5,5 ; la colonne témoin C3 présente systématiquement les valeurs de pH les plus fortes. A 35 cm ainsi qu'aux profondeurs plus importantes, les valeurs de pH sont voisines de 5,2 et très proches les unes des autres : 0,25 unité pH de différence au plus.

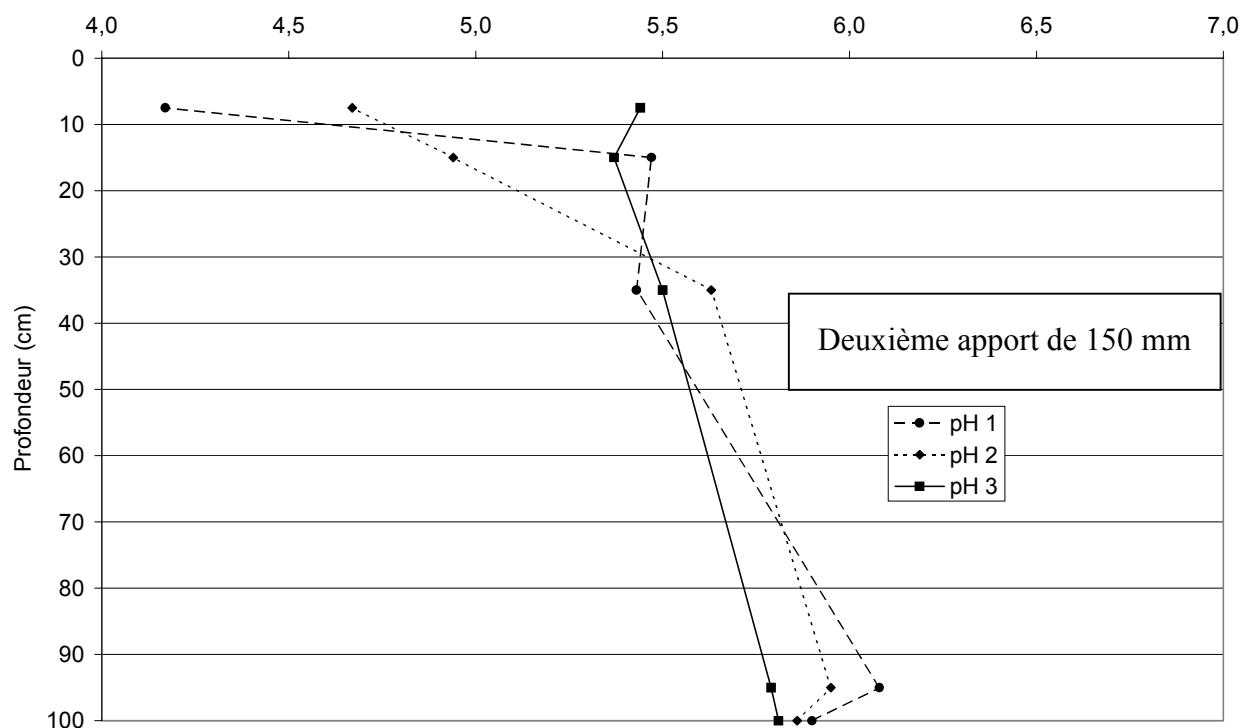
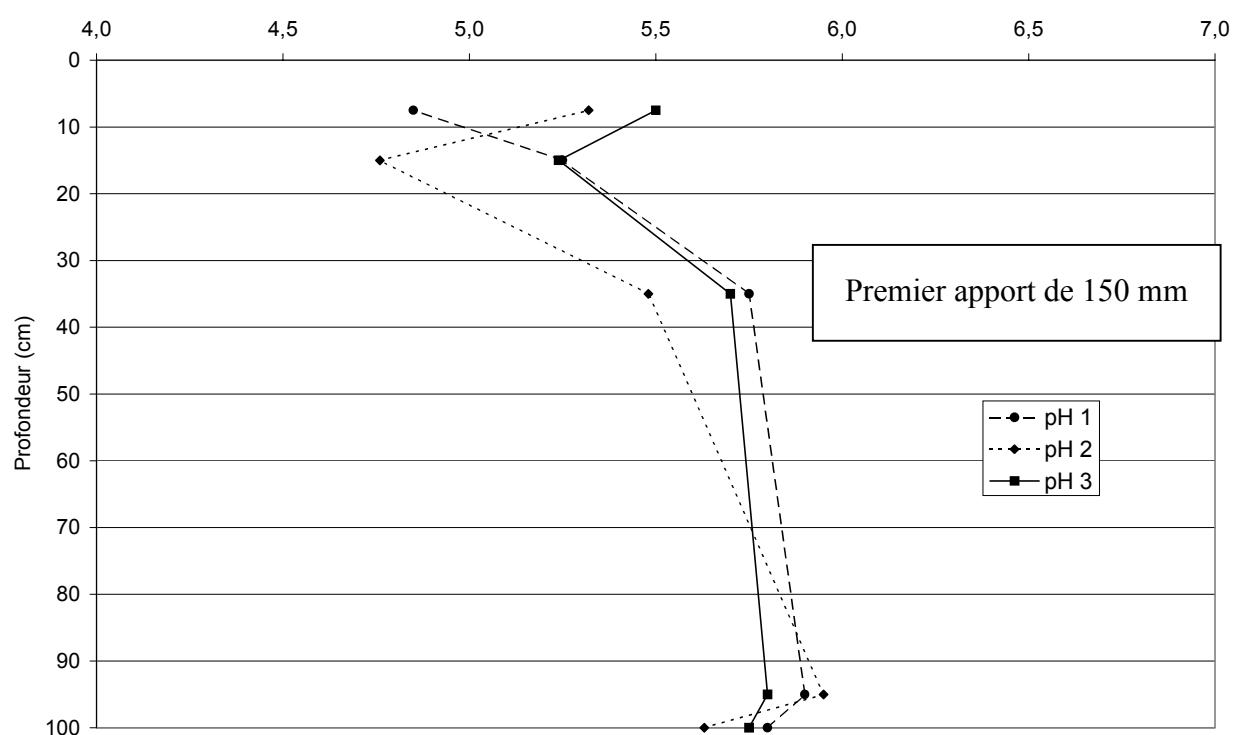


Figure 8 : Profils de pH au cours des premier et deuxième apports d'eau de 150 mm.

Les mesures du potentiel d'oxydo-réduction sont toutes comprises entre 500 et 600 mV pour les deux colonnes contenant du lisier. La colonne témoin C3 présente des valeurs en général plus faibles d'environ 50 mV. On notera que pour les trois colonnes, les valeurs de Eh tendent à devenir de plus en plus faibles avec la profondeur.

Les concentrations en oxygène dissous sont assez variables pour C1 : de 3,5 mg/l à 7,5 cm de profondeur, on descend à 3 mg/l à 15 cm puis entre 2 et 2,5 mg/l à partir de 35 cm. En revanche, pour C2 (contenant du lisier) et C3 (témoin), nous observons un comportement assez similaire puisque les concentrations augmentent de 2,5 mg/l à 3 mg/l puis 3,5 mg/l respectivement pour les profondeurs 7,5 cm, 15 cm et 35 cm. A la base de la colonne, les concentrations sont redescendues à 1,5 mg/l pour C3 témoin et 2 mg/l pour C2 contenant du lisier.

Les valeurs de conductivité électrique de la colonne témoin C3 augmentent régulièrement avec la profondeur pour passer de 50 μ S/cm en surface à 200 μ S/cm en profondeur. En revanche, pour C1 et C2 qui ont reçu du lisier, nous observons des valeurs allant de 750 à 950 μ S/cm à 7,5 cm et allant de 650 à 750 μ S/cm à 15 cm. A 30 cm, les valeurs sont identiques à celles de la colonne témoin à savoir environ 100 μ S/cm.

Les concentrations en nitrates dans la colonne témoin C3 varient avec la profondeur : de 35 mg/l à 7,5 cm, on passe à 150 mg/l à la base de la colonne. Pour les colonnes ayant reçu du lisier (C1 et C2), les concentrations atteignent 650 et 1050 mg/l à 7,5 cm de profondeur puis 550 à 650 mg/l à 15 cm de profondeur. A 35 cm, les valeurs sont identiques à celles de la colonne témoin ; c'est-à-dire environ 100 mg/l.

Les analyses chimiques complémentaires des pluies (réalisées par le laboratoire de Montpellier) montrent un flux de plusieurs éléments chimiques à 7,5 et 15 cm de profondeur dans C1 et C2, où du lisier a été ajouté et qui ne se retrouve pas dans la colonne témoin C3. Les éléments concernés sont : Ca, Mg, K, Na, Fe, Al, Mn.

Les concentrations en Ca sont comprises entre 30 et 100 mg/l pour C1 et C2 aux profondeurs 7,5 et 15 cm contre 3 et 7 mg/l pour le témoin C3. A 35 cm (avec environ 8 mg/l) et à la base des colonnes (avec de 15 à 25 mg/l), les concentrations en Ca sont identiques que les colonnes aient reçu du lisier ou non.

Les concentrations en Mg sont comprises entre 5 et 22 mg/l aux profondeurs 7,5 et 15 cm des colonnes C1 et C2 contre 1,5 et 0,7 mg/l pour le témoin C3. A 35 cm, les trois colonnes montrent des concentrations d'environ 0,9 mg/l tandis qu'à la base des trois colonnes les concentrations sont comprises entre 1,5 et 2,6 mg/l.

Les concentrations en K dans la colonne témoin C3 sont d'environ 0,3 mg/l aux profondeurs 7,5 et 15 cm tandis qu'elles atteignent 1 à 1,9 mg/l dans les colonnes avec lisier. A partir de 35 cm de profondeur les concentrations des trois colonnes sont identiques et comprises entre 0,1 et 0,25.

Les concentrations en Na sont comprises entre 15 et 33 mg/l à 7,5 et 15 cm de profondeur dans les colonnes C1 et C2 contre 3 à 4,5 mg/l dans la colonne témoin C3. A partir de 35 cm, les trois colonnes montrent des concentrations en Na assez identiques comprises entre 6 et 11 mg/l.

Les concentrations en Al sont toutes inférieures à la limite de détection dans la colonne témoin. Par contre, dans les colonnes C1 et C2, on observe des concentrations allant de 0,05 à 0,22 mg/l à 7,5 et 15 cm de profondeur. A 35 cm et à la base des colonnes ayant reçues du lisier, les concentrations en Al sont inférieures à la limite de détection.

La concentration du lisier en Mn est très faible (0,08 mg/l). Cependant, C1 contenant du lisier montre des concentrations en solution de 0,15 et 0,14 mg/l et pour C2 : 0,08 et 0,24 mg/l (respectivement à 7,5 et 15 cm de profondeur). Le témoin C3 présente des concentrations de 0,02 mg/l à 15 cm.

Les concentrations en Si sont invariantes, à une profondeur donnée, pour les différentes colonnes. En effet, pour les trois colonnes, on note les concentrations suivantes : 5 à 7 mg/l à 7,5 cm, 5 à 6 mg/l à 15 cm, 4 à 5 mg/l à 35 cm et 1 à 2 mg/l à 95 cm et en sortie de colonne.

Des concentrations 4 à 8 fois plus importantes en Zn sont décelées dans les colonnes C1 et C2 : 0,01 mg/l au plus dans la colonne témoin contre 0,04 à 0,08 dans les colonnes ayant reçues du lisier.

Quelles que soient les profondeurs et les colonnes, les concentrations en P, Cu, Ti sont toutes en dessous de la limite de détection (0,01 mg/l) alors que le lisier ajouté en contient respectivement 144,3 mg/l, 0,27 mg/l et 0,22 mg/l.

b. Deuxième apport d'eau de 150 mm (29 juillet 2003)

Le pH du témoin C3 varie relativement peu avec la profondeur (entre 5,4 à 5,8). En revanche, le pH de C1 est nettement plus bas à 7,5 cm de profondeur puisqu'il est proche de 4,15 ; puis, dès 15 cm de profondeur, il montre des valeurs identiques à celles de C3, *i. e.* autour de 5,5. C2 présente des valeurs de pH moins basses à 7,5 de profondeur (environ 4,7) mais à 15 cm, le pH est toujours de 4,9 et il ne retrouve des valeurs de 5,5 (comme pour les deux autres colonnes) qu'à partir de 35 cm de profondeur.

Pour les trois colonnes, les mesures de Eh sur les solutions sont comprises entre 575 et 675 mV pour les profondeurs les plus faibles (7,5 cm, 15 cm et 35 cm) et descendent jusqu'à des valeurs allant de 510 à 520 mV à 95 et 100 cm de profondeur. La colonne témoin présente systématiquement les valeurs les plus basses (environ 50 mV de moins jusqu'à 35 cm de profondeur puis identique à la base de la colonne).

Les mesures d'oxygène dissous du témoin C3 augmentent régulièrement de 7,5 à 35 cm de profondeur passant de 2,9 à 3,5 mg/l puis chutent à 1,9 mg/l à la base de la colonne. Pour C1 et C2, les valeurs présentent une évolution irrégulière entre 7,5 et 35 cm de profondeur mais avec des valeurs qui restent comprises entre 2,5 et 3,2 mg/l. A la base de ces deux colonnes, les concentrations en oxygène dissous sont de 2,3 mg/l à 95 cm (prélèvement par les rhizones) et entre 3,2 et 3,5 mg/l à 100 cm (exutoire de l'eau libre).

Les mesures de la conductivité électrique de la colonne témoin sont proches de 80 à 90 µS/cm à 7,5 et 15 cm de profondeur. A 35 cm et à la base de la colonne, on observe des valeurs autour de 200 µS/cm. C1 et C2 montrent, à 7,5 cm de profondeur, des valeurs de 650 et 1 150 µS/cm puis d'environ 550 µS/cm à 15 cm avant de tomber à 200 µS/cm à 35 cm, valeur identique à celle du témoin C3.

Les concentrations en nitrates (Figure 9 page suivante) de la colonne témoin augmentent régulièrement avec la profondeur : 100 mg/l à 7,5 cm de profondeur, 150 mg/l à 15 cm de profondeur, 320 mg/l à 35 cm et 400 mg/l à la base de cette colonne. En revanche, C1 et C2 présentent, à 7,5 cm de profondeur, des concentrations en nitrates de 1 600 et 3 000 mg/l diminuant respectivement à 1 450 et 1 850 mg/l à 15 cm puis à 475 et 350 mg/l à 35 cm de profondeur, concentrations qui deviennent alors très similaires à celles de la colonne témoin tout comme à la base de la colonne.

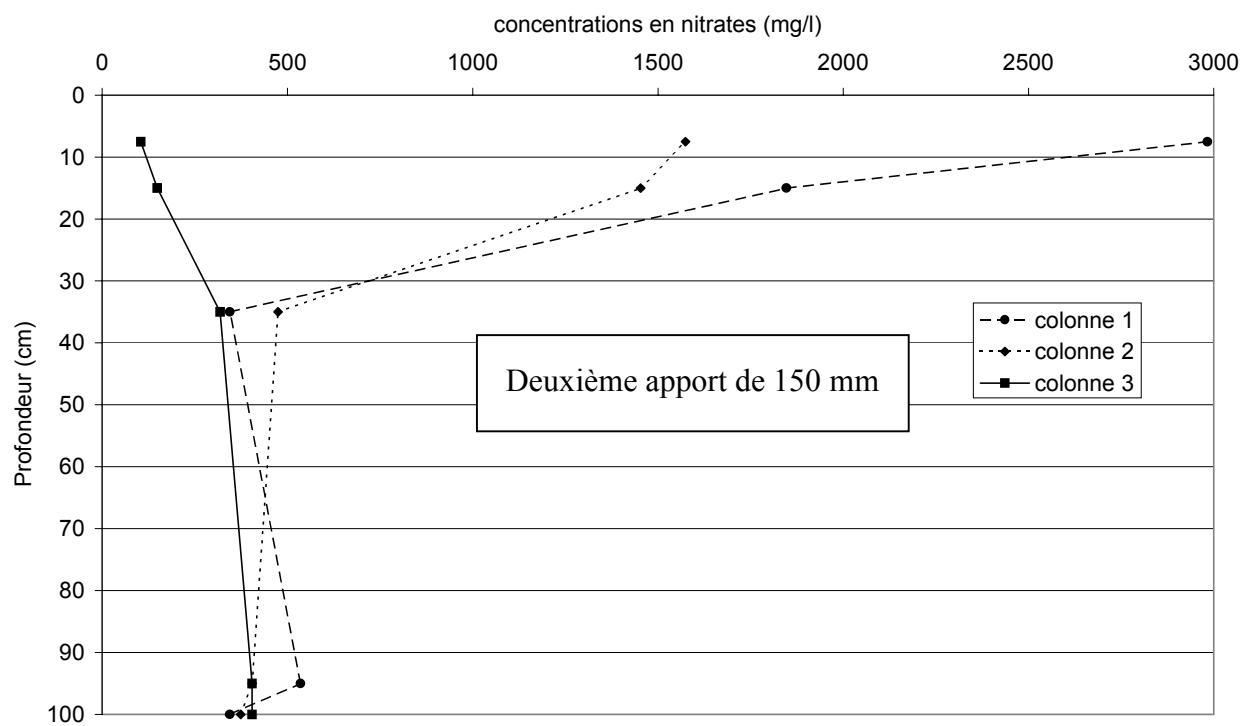
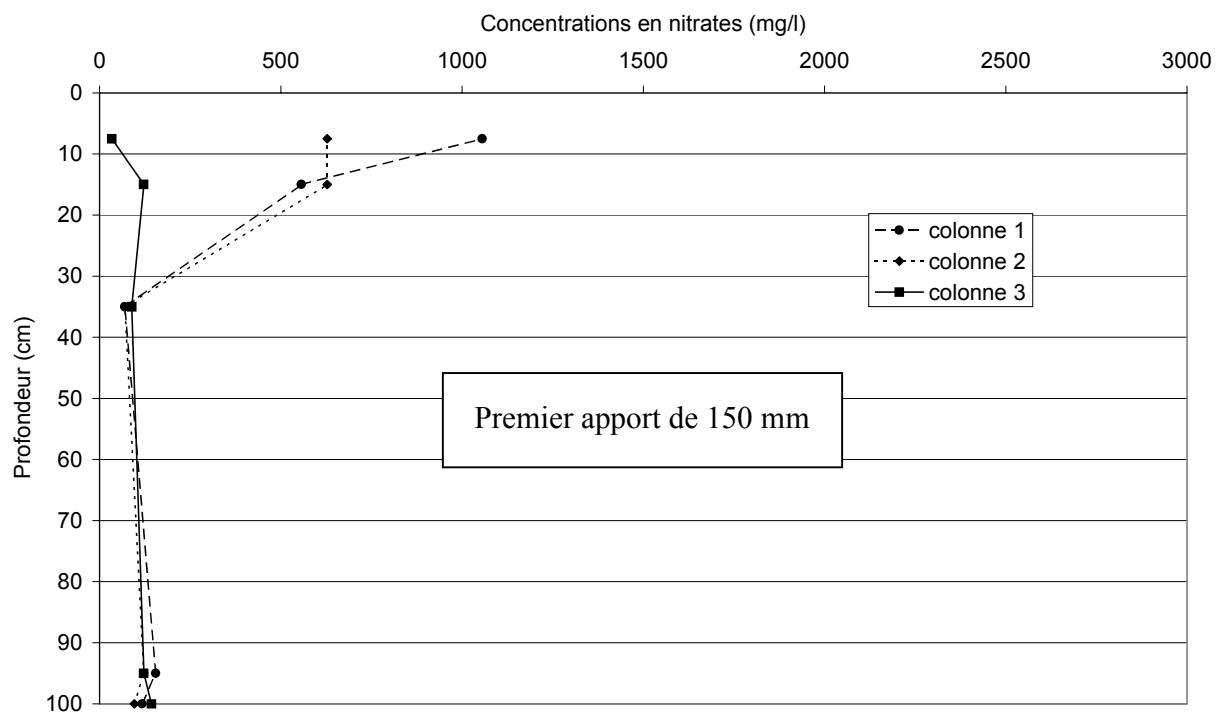


Figure 9 : Profils de concentrations en nitrates au cours des premier et deuxième apports d'eau de 150 mm.

c. Evolution des propriétés et de la composition chimique des eaux du sol

Le pH des eaux de la colonne témoin C3 n'a pas changé ni au cours du temps ni aux différentes profondeurs analysées lors des fortes pluies ; il est d'environ 5,5 voire 6 à la base de la colonne. Pour C1 et C2, qui ont reçu du lisier, les pH sont identiques à ceux du témoin C3 à 35 cm et à la base de la colonne mais sont plus faibles à 7,5 et 15 cm de profondeur. En effet, autour de 5 pendant la première pluie, il descend autour de 4,5 pendant la seconde pluie. Ce sont des valeurs moyennes ; cependant, nous noterons que C1 présente des pH souvent plus faibles. Bien que le pH du lisier soit de 7,6, l'acidification des eaux du sol est nettement observable jusqu'à 15 cm de profondeur et peut être relié à la dégradation de celui-ci.

Les valeurs du potentiel d'oxydo-réduction sont assez constantes au cours du temps à la base de la colonne (autour de 500 mV) mais, à 7,5 cm, 15 cm et 35 cm de profondeur, elles sont plus faibles au cours de la seconde pluie d'environ 100 mV. Nous noterons que c'est la colonne témoin C3 qui présente les valeurs systématiquement les plus basses. Ces valeurs permettent de dire que les eaux prélevées sont oxydantes et que l'apport de la matière organique du lisier n'a pas déclenché de forts processus de réduction ; le milieu reste bien oxygéné grâce aux apports d'eau oxydante même s'il semble qu'au cours du temps, ces valeurs de Eh aient tendance à diminuer et ce, d'autant plus avec la profondeur.

Les concentrations en oxygène dissous confirment les mesures du potentiel d'oxydo-réduction. En effet, on observe entre 1,5 et 3 mg/l d'oxygène dissous dans les eaux prélevées ce qui dénote un caractère oxydant de ces eaux. On ne note pas d'évolution particulière au cours du temps ; le fait d'ajouter de fortes quantités d'eau permet expliquer cela. Cependant, les concentrations en oxygène dissous sont souvent plus élevées en surface pour la colonne témoin et particulièrement au cours de la seconde pluie, ce qui peut s'expliquer par une moindre consommation en oxygène contrairement aux colonnes où du lisier a été ajouté.

Les mesures de la conductivité électrique réalisées en bas de colonne ne montrent ni évolution, ni différence importante entre les colonnes et au cours du temps. Cependant, au cours des deux pluies, les mesures réalisées à 7,5 cm, 15 cm et 35 cm de profondeur permettent d'observer un flux important d'éléments chimiques que l'on n'observe absolument pas dans la colonne témoin. Ce flux est, pour les deux pluies, plus important à 7,5 cm de profondeur qu'à 15 cm et devient identique à la colonne témoin à 35 cm. Cela s'explique par la dégradation puis la mise en solution d'éléments chimiques provenant du lisier et de leur entraînement progressif en profondeur.

Les mesures de la concentration en nitrate montrent une augmentation significative au cours du temps à la base des trois colonnes. Cette augmentation ne doit pas être reliée à l'apport de lisier mais plutôt à la minéralisation naturelle du sol ; c'est un phénomène que nous avons déjà observé et qui s'explique par les conditions de mise en place du sol (déstructuration lors du prélèvement et tamisage). Par contre, au cours des deux pluies, nous observons un flux de nitrates à 7,5 cm et 15 cm de profondeur nettement plus important dans les colonnes ayant reçu du lisier. Ces mesures peuvent être mises en parallèle avec celles de la conductivité électrique. Pour C1, entre la première et la deuxième pluie, les concentrations en nitrate à 7,5 cm de profondeur passent de 1 000 mg/l à 3 000 mg/l et pour C2, de 600 à 1 600 mg/l. A 15 cm de profondeur, les concentrations en nitrates passent d'environ 600 à 1 450 mg/l pour C2 et 1 850 pour C1. On observe donc nettement des concentrations en nitrate qui augmentent au cours du temps aux deux profondeurs les plus superficielles et avec des concentrations toujours plus élevées à 7,5 cm qu'à 15 cm, ce qui laisse supposer que le lisier est en début de phase de dégradation et que la lixiviation du nitrate est en régime transitoire montant.

Pour les autres éléments chimiques, il est possible de les regrouper en fonction de leur comportement observé (Tableau 2 page suivante). Ainsi, on note, au cours de la première pluie, pour Ca, Mg, K, Na, Al, Mn et Zn, des concentrations significativement plus importantes à 7,5 cm et 15 cm de profondeur, dans les colonnes ayant reçu du lisier par rapport à la colonne témoin. Au cours de la seconde pluie, on observe que Ca, Mg et Na (mais pour ce dernier, cela ne concerne que C2) présentent des concentrations nettement supérieures à 35 cm de profondeur. En revanche, pour K, Na (C1 seulement), Al, Mn et Zn, les concentrations sont identiques à celle de la colonne témoin. Pour Si,

on observe un comportement spécifique puisque c'est seulement à 7,5 cm de profondeur que l'on observe une augmentation par rapport à la colonne témoin et ce, pour les deux pluies.

Les concentrations en P, Cu et Ti sont négligeables ou inférieures à la limite de détection pour tous les prélèvements. Cependant, si les concentrations du lisier en Cu et Ti sont faibles, respectivement de 0,27 et 0,22 mg/l, il convient de noter que les concentrations en P du lisier sont importantes avec 144 mg/l. La très grande affinité pour les phosphates de certains minéraux spécifiques des andosols (allophanes, imogolites notamment) pourrait expliquer l'absence de P dans les eaux recueillies.

pH	Eh	O ₂	CE	NO ₃ ⁻	Ca	Mg	K	Na	Al	Mn	Si	Zn	Cu	Ti	
+	=	=	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	=	=	7,5 cm
+	=	=	+	+	+	+	++	+	+	+	=	+	=	=	15 cm
=	=	=	=	=	+	+	=	+ ^a	=	=	=	=	=	=	35 cm
=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	95 cm

^a : observé que sur l'une des deux colonnes.

Tableau 2 : Présence (+) ou absence (=) de différence de teneurs en éléments chimiques ou de caractères physico-chimiques entre les deux colonnes ayant reçu du lisier C1 et C2 et la colonne témoin C3, en fonction de la profondeur.

d. Différence entre prélèvements à 95 cm et en bas de colonne

En comparant les analyses effectuées sur les prélèvements à 95 cm par rhizone et les eaux de drainage recueillies en bas de colonne, nous observons :

- ♦ une différence de pH et de potentiels redox négligeable pour les 3 colonnes avec une évolution également négligeable du pH (entre 5,7 et 6) et du potentiel redox (entre 400 et 500mV),
- ♦ une concentration en oxygène dissous significativement plus élevée en bas de colonne qu'à 95 cm, imputée à i) une meilleure conservation de l'oxygène dissous par les prélèvements par rhizones qu'en bas de colonne, ii) des écoulements préférentiels d'eau bien oxygénée le long des parois du tube, ou iii) la réoxygénération des eaux de drainage au contact avec l'atmosphère en bas de colonne.
- ♦ de faibles différences de conductivité électrique pour les 3 colonnes avec quasiment toutes les valeurs comprises entre 150 et 250 µS/cm.

Pour l'ensemble des éléments chimiques étudiés, nous n'observons pas de différences majeures entre les prélèvements d'eaux libres réalisées à l'exutoire des colonnes et les prélèvements par les rhizones à 95 cm de profondeur.

B. Transferts d'eau et de solutés

a. Cohérence globale du fonctionnement hydrique des colonnes

Les données brutes TDR ont été transformées en humidité au moyen d'une loi d'étalonnage mise au point spécifiquement pour l'andisol des Colimaçons (ANNEXE 9). Nous avons représenté sur la Figure 10 (page suivante), pour chaque colonne, l'évolution dans le temps des humidités mesurées aux trois profondeurs ainsi que la lame drainée en bas de colonne en fonction des apports d'eau. Nous observons globalement une bonne cohérence du régime hydrique puisque après chaque apport d'eau l'humidité des capteurs superficiels (15 et 35 cm) augmente sensiblement, l'effet étant naturellement plus marqué à 15 cm où l'eau arrive plus rapidement et en plus grande quantité. Le capteur profond ne réagit qu'aux apports importants (>100 mm) car de gros volumes sont nécessaires pour modifier l'humidité à cette profondeur et les petits volumes ne contribuent qu'au drainage sans modifier notablement l'humidité très proche de la saturation. Nous observons les plus fortes fluctuations d'humidité lors de la phase de drainage (18 au 26/06/03). Enfin, les transferts par drainage puis ressuyage / évaporation sont clairement perceptibles lors des phases sèches suivant des apports importants (27/06/06 au 01/07/03 et 31/07/03 au 18/08/03).

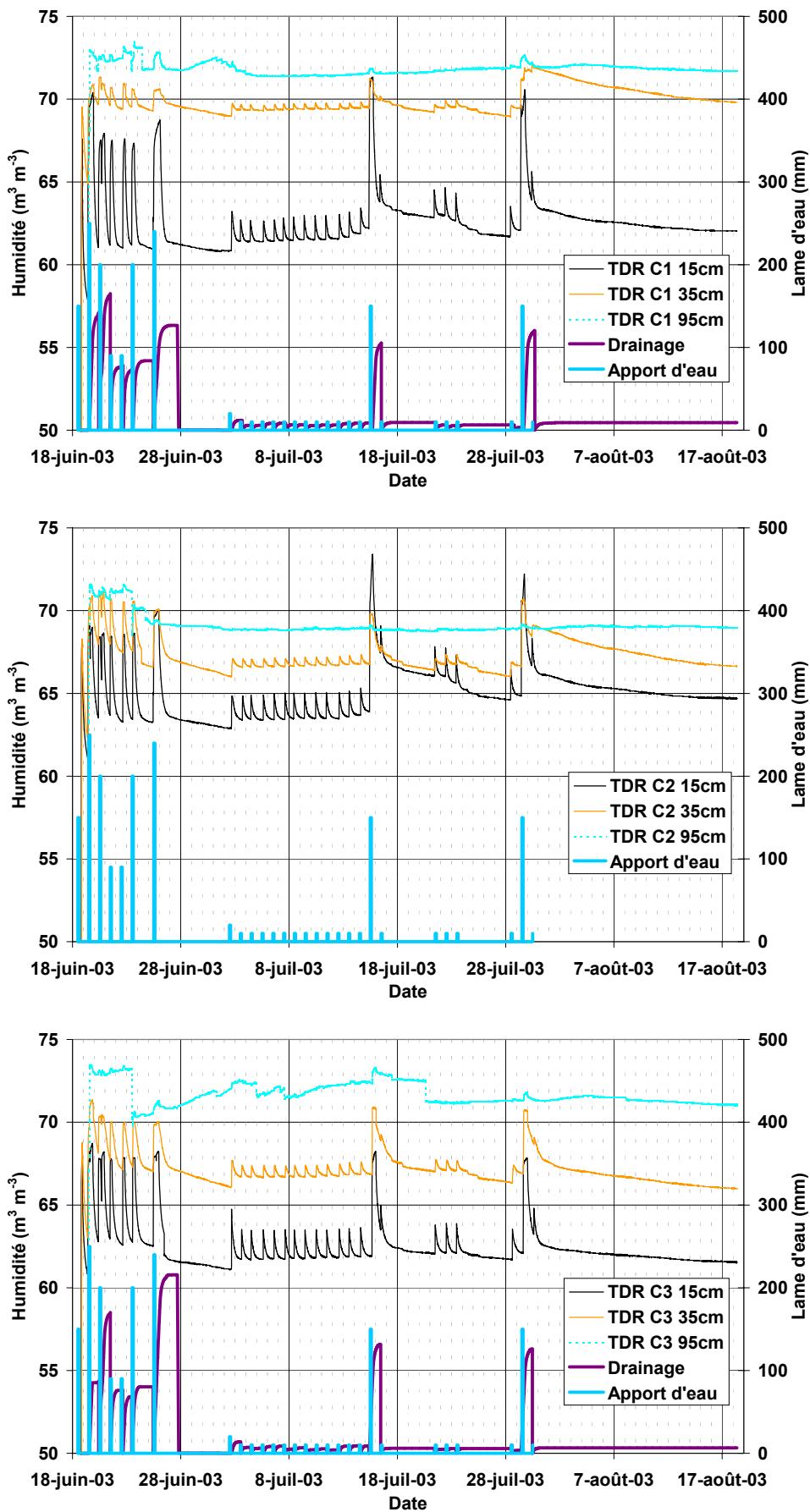


Figure 10 : Evolution des humidités et du flux de drainage en fonction des apports d'eau

b. Bilan hydrique

Pour calculer le bilan hydrique de chaque colonne nous avons défini 4 dates clefs réparties le long de l'expérimentation : $t_1 = 02/07/03$ à 12h00 (juste avant l'épandage de lisier), $t_2 = 18/07/03$ à 12h00 (fin du drainage après le premier apport d'eau de 150 mm), $t_3 = 1/08/03$ à 12h00 (fin du drainage après le deuxième apport d'eau de 150 mm) et $t_4 = 18/08/03$ à 8h45 (fin de l'acquisition automatique de données). Nous avons calculé un bilan hydrique pour chaque colonne entre t_1 et t_2 , t_2 et t_3 , t_3 et t_4 , en appliquant la formule :

$$\Delta S = A + D + E + DB$$

avec ΔS , variation de stock d'eau du sol de la colonne (mm), A , apport d'eau (mm), D , drainage en bas de colonne (mm), E , évaporation de la colonne (mm) et DB défaut de bilan (mm). Toutes ces variables sont des grandeurs algébriques (positives ou négatives).

L'évaporation a été estimée constante pour chaque colonne et déduite du régime de décroissance du stock en eau de la colonne de t_3 à t_4 (pas d'apport ni de drainage), ce qui a fourni une évaporation journalière de 0,86 mm, 0,92 mm et 0,62 mm pour C1, C2 et C3 respectivement. En l'absence de pluviographe en bas de C2 nous n'avons pas pu estimer la lame drainée et le défaut de bilan pour cette colonne. La figure 11 (page suivante) illustre le résultat des calculs et permet de quantifier les différents termes du bilan. Nous constatons tout d'abord une homogénéité globale du fonctionnement hydrique qui justifie *a posteriori* le choix du travail sur sol remanié. Un autre résultat important est que le stock d'eau du sol est très stable au cours du temps (proche de sa valeur maximale) ; ainsi l'intégralité des apports d'eau est évacuée de la colonne soit par drainage (terme dominant), soit par évaporation, soit par divers processus regroupés dans le terme défaut de bilan. Ce défaut de bilan intègre pour partie les pertes lors des prélèvements de solution par les rhizones (environ 70 ml) ou en bas de colonne (environ 100 ml) et qui peuvent représenter jusqu'à 25 mm (entre t_1 et t_2). Il comprend également les fuites qui se sont manifestées, en particulier sur C3, qui sont difficiles à estimer précisément mais doivent sûrement représenter plusieurs dizaines de millimètres.

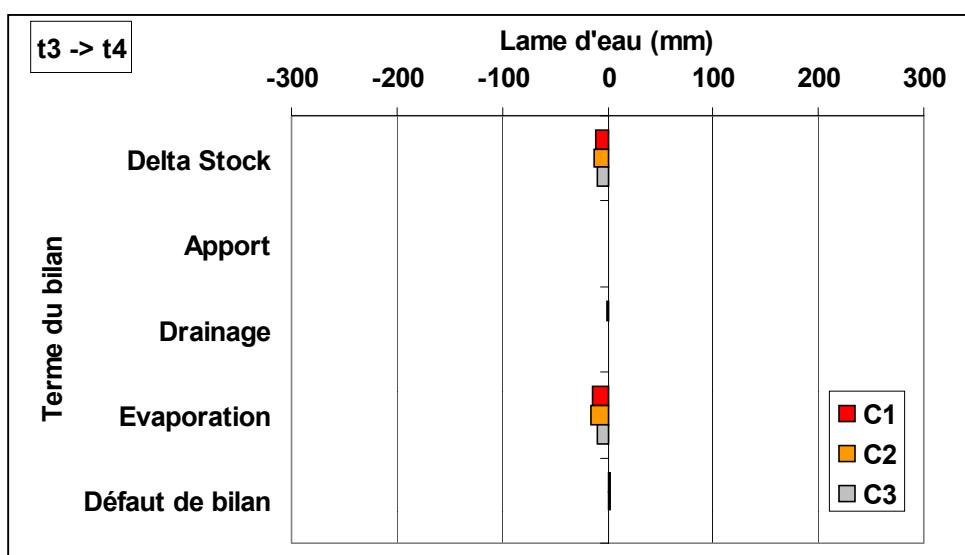
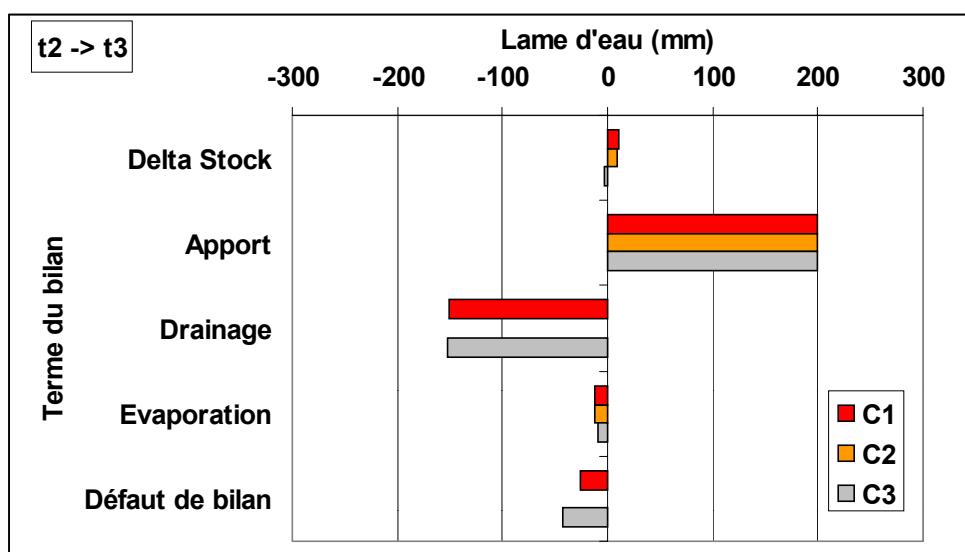
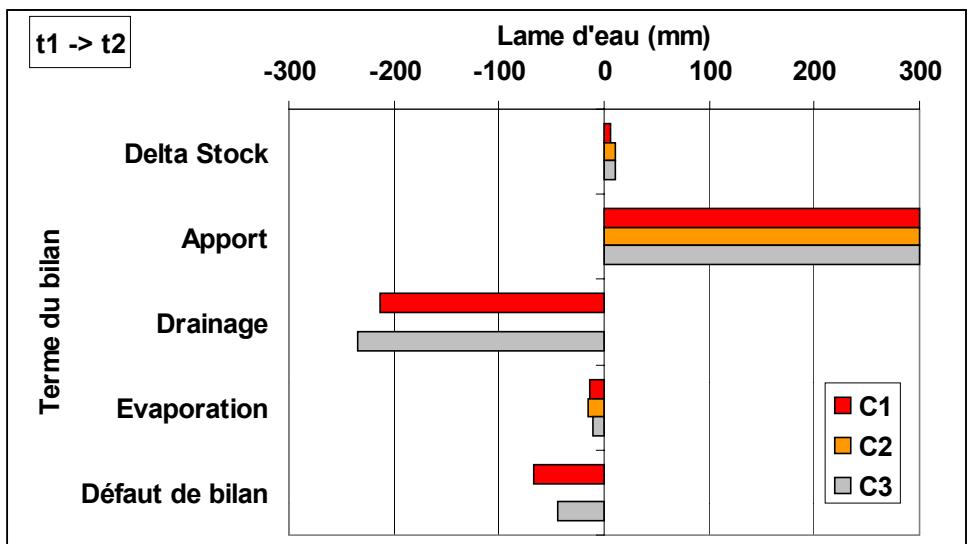


Figure 11 : Bilan hydrique des 3 colonnes pour trois plages de dates caractéristiques

c. Estimation des débits spécifiques et conductivité hydraulique à saturation

Nous avons cherché à estimer la vitesse des transferts d'eau dans les colonnes en calculant pour C1 et C3 le débit spécifique de drainage q (m s^{-1}) selon la formule :

$$q = \frac{1}{1000} \frac{dD}{dt}$$

Le débit spécifique a été calculé pour toute la période de l'expérimentation (Figure 12). Pour estimer la conductivité hydraulique à saturation K_s (m s^{-1}) nous avons choisi les périodes où le débit spécifique était le plus élevé, qui correspondent aux régimes d'écoulement les plus proches de l'écoulement saturé. Nous avons calculé K_s par application de la loi de Darcy :

$$q = K_s \frac{L + h}{L}$$

avec $L = 1 \text{ m}$, hauteur de la colonne de sol et $h = 0,15 \text{ cm}$, charge d'eau typique en haut de colonne. Ce calcul a fourni une valeur de $4,7 \cdot 10^{-7}$ et $4,0 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ pour C1 et C3 respectivement.

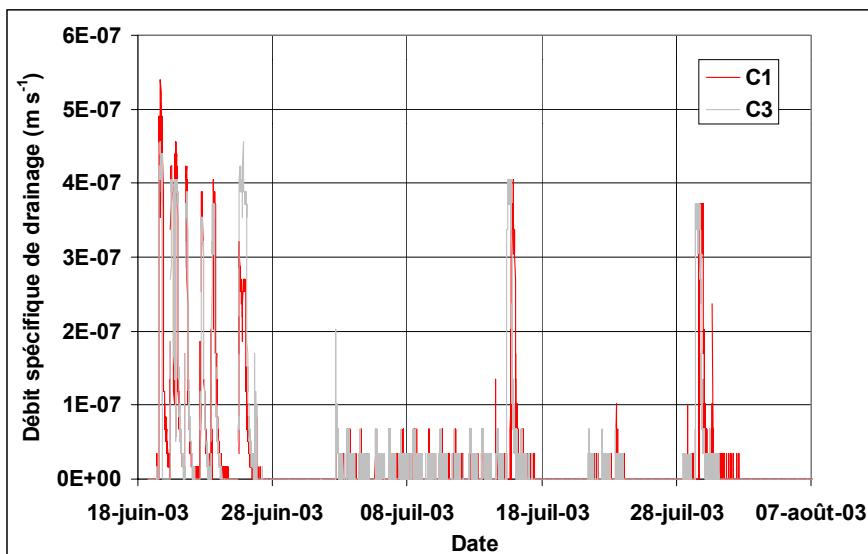


Figure 12 : Mesure du débit spécifique en bas de colonne (C1 et C3)

Ces valeurs sont en bon accord avec d'autres mesures réalisées précédemment au moyen d'un perméamètre à saturation sur des échantillons non remaniés de 100 cm^3 , prélevés dans l'horizon 60-100 du sol des Colimaçons.

d. Bilan de solutés

Nous avons calculé un bilan de solutés pour trois espèces chimiques au comportement contrasté, présentes en différentes concentrations dans le sol et le lisier, et pour lesquelles un transfert vers les horizons profonds a été observé (cf. section IV.2.A.). Il s'agit du nitrate, du zinc et du potassium. Les bilans ont été calculés entre les dates des deux gros apports d'eau (15 et 29/07/03) et sont présentés dans le Tableau 3 (page suivante).

	Nitrate (mg)			Zinc (mg)			Potassium (mg)		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
15/07/03	3312	2829	575	0,22	0,16	0,01	5,6	5,3	1,2
29/07/03	9942	7127	1656	0,21	0,11	0,02	18,1	7,2	1,3
Variation	6630	4298	1081	0,01	-0,05	0,01	12,5	1,9	0,1
Lisier ^a	6800	6800	0	0,96	0,96	0	3916	3916	0

^a : il s'agit pour le lisier des quantités d'azote total.

Tableau 3 : Teneur globale de trois espèces chimiques en solution dans les 3 colonnes.

Concernant l'azote, nous remarquons tout d'abord un fort effet de l'épandage de lisier qui entraîne un transfert de nitrate dans la colonne de 2,2 à 2,7 g au premier apport et 5,5 à 8,3 g au deuxième apport. Ces quantités ne contribuent pas encore aux concentrations observées en bas de profil (Tableau 2 p26). La minéralisation est clairement visible sur le témoin puisque 1,1 g d'azote est produit en 14 jours dans C3. Enfin, l'augmentation de la teneur en nitrate dans C1 est supérieure à la somme de la teneur en azote total du lisier et de la minéralisation de C3, ce qui suggère un *priming effect* (augmentation de l'activité microbienne du sol suite à apport de matière organique fraîche).

Concernant le zinc, on note une réponse contrastée des colonnes avec lisier C1 et C2 qui voient leur teneur en cet élément passer d'approximativement 0 à 0,1 voire 0,2 mg. La colonne témoin présentant des teneurs très faibles. Une partie non négligeable du zinc apporté par le lisier semble donc migrer vers les horizons profonds et est susceptible d'engendrer une pollution du sous-sol et des nappes. Enfin, notons que la baisse du potentiel d'oxydo-réduction associée à l'épandage de lisier peut occasionner une libération supplémentaire du pool important de zinc (21 g par colonne) contenu dans certaines phases minérales constitutives du sol (oxydes de fer et de manganèse).

e. Estimation des transferts de solutés

Nous avons enfin cherché à estimer les quantités de nitrate et de zinc, éléments potentiellement polluants, susceptibles d'être transférées vers le sous-sol et les nappes. Pour ce faire, nous avons considéré quatre scénarios croisant 2 régimes d'écoulement et deux concentrations pour chaque élément. Les faibles concentrations correspondent à des valeurs typiques de la colonne témoin C3, tandis que les concentrations élevées sont représentatives des colonnes avec lisier C1 et C2. Le régime d'écoulement lent ($q = 5,9 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$) correspond au régime rencontré pour les petits apports (Figure 12), alors que le régime rapide fait référence aux apports importants ($q = 4,7 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$). Les temps moyens de percolation de la solution du sol à travers la colonne ont été calculés. Puis, pour chaque scénario, les quantités lixivierées ont été estimées par multiplication du flux d'eau par la concentration en l'élément suivi (hypothèse d'un transport uniquement convectif) et sont données dans le Tableau 4. Nous voyons tout d'abord qu'en fonction du régime hydrique la solution du sol peut mettre de 25 jours à plus de 6 mois pour traverser le mètre de sol de la colonne. La dynamique de pollution est donc intimement liée au régime d'écoulement. Pour ce qui est du nitrate, les flux simulés sont compris entre 0,17 et 4,49 $\text{g NO}_3 \text{ j}^{-1}$, ce qui représente des quantités de 3 à 90 $\text{kg}_N \text{ ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$. En l'absence de culture cette pollution est importante sans épandage et très forte avec épandage. Enfin, concernant le zinc, on peut considérer que la pollution est faible sans épandage. En revanche, elle n'est plus négligeable en présence de lisier, pour des apports d'eau importants ($0,20 \text{ mg j}^{-1}$).

	Régime d'écoulement	
	Lent	Rapide
Temps de percolation (j)	196	25
Nitrate :		
C = 300 mg l ⁻¹	169	1346
C = 1000 mg l ⁻¹	563	4485
Zinc :		
C = 0,01 mg l ⁻¹	0,01	0,04
C = 0,05 mg l ⁻¹	0,03	0,22

Tableau 4 : Quantités d'azote et de zinc lixiviés (mg j⁻¹) pour différents scénarios d'écoulements et de concentrations

Synthèse et conclusion

Les objectifs de ce stage étaient multiples et variés. Tout d'abord, il s'agissait d'engager une collaboration entre deux équipes de recherche afin de développer un outil d'étude et de suivi des pollutions dans les sols. La mise en place de cet outil a requis d'importants préparatifs techniques. La réalisation des colonnes de sol, leur instrumentation, l'automatisation des mesures ont été menées à bien malgré certaines difficultés, parfois imprévues. Ensuite, à l'aide de cet outil « colonnes de sol », nous avons cherché à observer et comprendre le fonctionnement de 3 colonnes soumises à un régime contrôlé d'apport en eau, avec ou sans épandage de lisier. Nous avons axé l'étude sur deux aspects fondamentaux et complémentaires :

- ♦ le fonctionnement géochimique (phase initiale de la dégradation d'un déchet organique dans un sol particulier) ;
- ♦ le fonctionnement hydrique (transfert d'eau et de solutés dans ce sol).

Les résultats que nous avons obtenus nous permettent d'appréhender et de discuter les problèmes et les risques de pollution des sols et des eaux, liés à l'utilisation agronomique du déchet organique lisier. Les modifications physico-chimiques du système sol font partie intégrante des risques à prendre en compte. Ainsi, l'acidification des eaux du sol, qui fait suite à l'épandage du lisier, est susceptible de favoriser certains problèmes de toxicité (aluminique, par exemple). Cependant, dans le cadre restreint en temps de ce stage, nous n'avons pas pu observer de phase de réduction du sol particulièrement marquée, souvent néfaste aux cultures. Par ailleurs, l'affinité particulièrement forte du phosphore ou la saturation du complexe d'échange par le potassium risquent de poser des problèmes de nutrition pour certaines cultures et d'entraîner une déstabilisation de la structure du sol.

La dégradation rapide du lisier, bien qu'incomplète, a généré un flux de nitrate très important, ainsi que des flux de potassium et de zinc plus modérés, dans les horizons de surface. En l'absence de culture, ces flux de nitrate contribuent très fortement à une pollution des eaux profondes en venant suralimenter les flux de lixiviation déjà important, du simple fait de la minéralisation naturelle du sol. Concernant le zinc, on peut craindre une pollution modérée sous épandage lors des épisodes pluvieux extrêmes, la dynamique de pollution étant intimement liée au régime hydrique du sol. Enfin, les analyses de l'élément trace métallique cuivre, montre une absence de mobilité en solution malgré des apports non négligeables via le lisier. Ce résultat indique que cet élément a tendance à s'accumuler en surface et constitue donc localement une source de pollution.

Conclusion personnelle

Ce stage aura vraiment été très enrichissant sur un plan personnel. Il m'a non seulement permis d'acquérir de nouvelles compétences et connaissances mais aussi de mettre en pratique celles que j'avais acquises à l'IUP dans ce domaine.

Au niveau des connaissances, j'ai du m'immerger dans le monde de l'agriculture et de l'élevage à La Réunion. J'ai ainsi pu découvrir les différentes problématiques qui contraignent actuellement ces activités comme, par exemple, la lutte pour l'espace contre une urbanisation grandissante. De même, j'ai pu observer certaines pratiques culturelles et les problèmes qu'elles pouvaient engendrer. Même si je suis réunionnais, l'étude des caractéristiques pédologiques et géologiques de la Réunion aura été pour moi une réelle découverte. En effet, je n'avais jamais eu l'occasion d'aborder ces thèmes lors de mon cursus scolaire à La Réunion. D'un point de vue plus général, j'ai pu comprendre le fonctionnement d'un sol et les différents paramètres à étudier pour mettre en évidence son comportement. J'ai aussi développé des compétences dans les domaines des analyses chimiques. Durant mes trois années de travail à l'IUP, j'ai souvent eu l'occasion de travailler sur des analyses d'eau, notamment lors des applications de deuxième année. Ce stage m'a permis d'approfondir mes connaissances et de les élargir. Je maîtrise aussi assez bien le fonctionnement et la conception des colonnes de sol et la manière de préparer l'expérimentation.

D'une manière plus générale, je pense avoir aujourd'hui plus d'autonomie dans mon travail alors qu'au début de mon stage je n'osais pas trop prendre d'initiatives. J'ai aussi pu comprendre comment gérer un travail se déroulant sur un laps de temps aussi important. La collaboration avec les membres du CIRAD m'aura appris à mieux planifier mon travail. Il m'a aussi fallu développer une certaine adaptabilité et repenser ce planning en fonction des évolutions du travail. Au contact des membres des deux équipes, j'ai pu découvrir différents travaux menés dans la recherche agronomique et leur application. Ce travail m'a aussi permis de perfectionner ma façon de présenter mon travail car j'ai pu rencontrer des personnes appartenant à différents organismes agricoles à La Réunion (comme la M.V.A.D : Mission de Valorisation Agricole des Déchets) mais aussi dans l'Océan Indien (délégation de Mayotte, de Madagascar...) auxquelles j'ai présenté brièvement cette expérimentation. J'ai ainsi compris comment il fallait leur exposer cette manipulation pour qu'ils en saisissent tout de suite l'intérêt et la nécessité.

Bibliographie

Ouvrages et publication

Chopart, J.-L. et M. Mézino (2003). *Caractéristiques des précipitations et des risques d'excès d'eau dans l'environnement du poste météorologique des Colimaçons (moyenne altitude dans l'Ouest de l'île de la Réunion)*. Programme Canne à Sucre (CIRAD CA). 13 pp.

De Cockborne, A.-M., L. Bruckler, G. Sévenier and M. Gasc (2001). *Nutrient leaching from soil amended with apple waste*. Agronomie 21: 215-226.

De Cockborne, A.-M., L. Bruckler, G. Sévenier and V. Vallès (2002). *Conséquences de l'épandage de pommes de retrait sur la qualité des eaux de drainage*. Etude et Gestions des Sols 9(1): 25-41.

MVAD, *Mission de Valorisation Agricole des Déchets (2002) Valorisation agricole des déchets à la Réunion – Synthèse des résultats agronomiques, techniques et économiques acquis par la MVAD entre 1996 et 2002*, 53 p

Pehkonen, S O., Erey, Y. and Hoffmann, M R. (1992) *Simultaneous spectrophotometric measurement of Fe(II) and Fe(III) in atmospheric water*. *Environmental science and technology*. Vol. 26, 9.

Raunet, M (1991) *Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion*, 360 p

Sites internet

[www.cirad .fr](http://www.cirad.fr)

www.sdec-france.com

ANNEXES

ANNEXE 1 : Profil de densité de l'andosol des Colimaçons

ANNEXE 2 : Coupe d'un étage d'instruments

ANNEXE 3 : Scénario de pluie

ANNEXE 4 : Analyse du lisier de porc

ANNEXE 5 : Analyse de l'andosol des Colimaçons

ANNEXE 6 : Tableau de résultats de la colonne 1

ANNEXE 7 : Tableau de résultats de la colonne 2

ANNEXE 8 : Tableau de résultats de la colonne 3

ANNEXE 9 : Loi d'étalonnage des sondes TDR CS616

ANNEXE 1 :
Profil de densité de l'andosol des Colimaçons

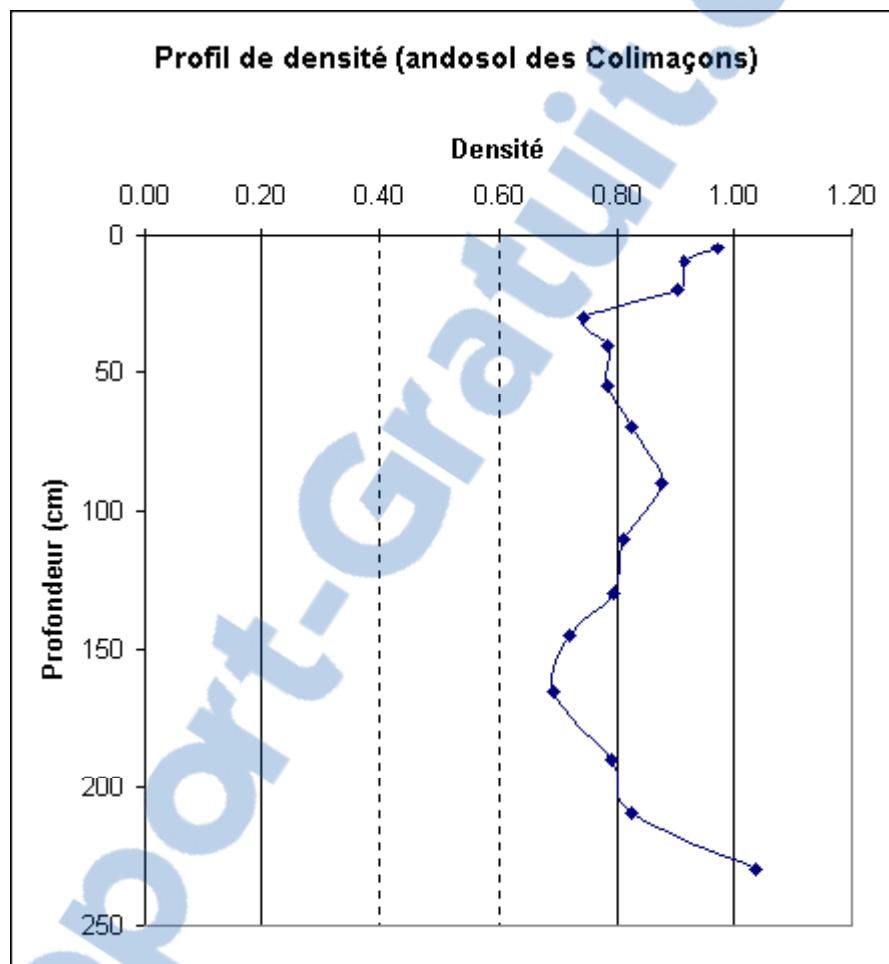


Figure 13 : Profil de densité de l'andosol des Colimaçons

ANNEXE 2 :
Coupe d'un étage d'instruments

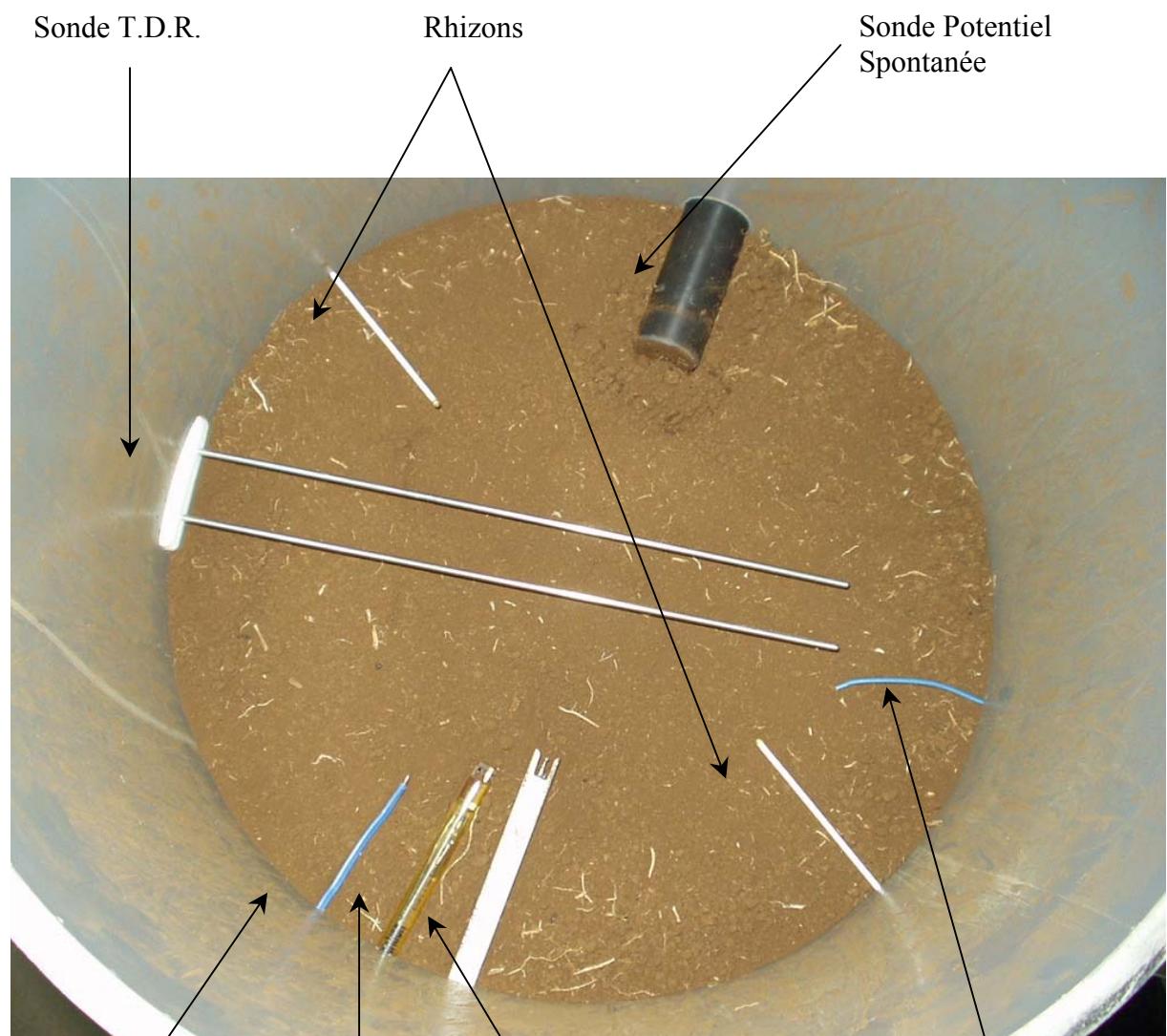


Figure 14 : Coupe d'un étage d'instrument

ANNEXE 3 :
Scénario de pluie

Dates	Quantité d'eau ajoutée	Phases
18/06/2003	150 mm	Drainage
19/06/2003	250 mm	
20/06/2003	200 mm	
21/06/2003	90 mm	
22/06/2003	90 mm	
23/06/2003	200 mm	
24/06/2003	240 mm	
25/06/2003	0 mm	Réessuyage
26/06/2003	0 mm	
27/06/2003	0 mm	
28/06/2003	0 mm	
29/06/2003	0 mm	
30/06/2003	0 mm	
31/06/2003	0 mm	
01/07/2003	0 mm	Scénario humide
02/07/2003	20 mm de lisier dans C1 et C2 et 18 mm d'eau dans C3	
03/07/2003	10 mm	
04/07/2003	10 mm	
05/07/2003	10 mm	
06/07/2003	10 mm	
07/07/2003	10 mm	
08/07/2003	10 mm	
09/07/2003	10 mm	
10/07/2003	10 mm	
11/07/2003	10 mm	
12/07/2003	10 mm	
13/07/2003	10 mm	
14/07/2003	10 mm	Réessuyage
15/07/2003	150 mm	
16/07/2003	10 mm	
17/07/2003	0 mm	
18/07/2003	0 mm	
19/07/2003	0 mm	Scénario sec
20/07/2003	0 mm	
21/07/2003	10 mm	
22/07/2003	10 mm	
23/07/2003	10 mm	
24/07/2003	0 mm	
25/07/2003	0 mm	
26/07/2003	0 mm	
27/07/2003	0 mm	
28/07/2003	10 mm	
29/07/2003	150 mm	
30/07/2003	10 mm	

Tableau 5 : Scénario de pluie

ANNEXE 4 :
Analyse du lisier de porc

pH		7,63
Eh	mV	-114
Conductivité Electrique	$\mu\text{S} / \text{cm}$	Entre 14000 et 14400
Oxygène dissous	mg / l	0,18
Azote Organique	g / l	1,7
Ammonium	g / l	1,7
Nitrates	g / l	0
Calcium	mg / l	49,54
Magnésium	mg / l	22,37
Potassium	mg / l	1957,90
Sodium	mg / l	362,01
Fer	mg / l	1,02
Aluminium	mg / l	0,40
Manganèse	mg / l	0,08
Phosphore	mg / l	144,30
Silicium	mg / l	44,28
Cuivre	mg / l	0,27
Zinc	mg / l	0,48
Titane	mg / l	0,22
Matière sèche	%	5,25

Tableau 6 : Analyse du lisier de porc

ANNEXE 5 :
Analyse de l'andosol des Colimaçons

Profondeur	cm	0-20	40-60	80-100
------------	----	------	-------	--------

Matière organique

Matière Organique	Matière organique	%	6,69	2,98	2,55
	Carbone organique	%	3,88	1,73	1,48
	Azote total	‰	4,05	1,65	1,22
	C/N		9,58	10,47	12,11

Complexe d'échange ($\text{Co}(\text{NH}_3)_6\text{C}_{13}$)

Complexe d'échange-Acidité	Ca éch	me/100g	7,32	3,50	3,30
	Mg éch	me/100g	1,11	0,57	0,70
	K éch	me/100g	0,75	0,15	0,02
	Na éch	me/100g	0,12	0,21	0,30
	Al éch	me/100g	0,16	0,02	0,02
	Mn éch	me/100g	0,05	0,02	0,01
	H éch	me/100g	0,04	0,01	0,01
	S (Ca, Mg, K, Na)	me/100g	9,29	4,43	4,31
	CEC	me/100g	12,14	7,34	7,22
	TS	%	0,70	0,60	0,58
	pH Co		4,89	5,22	5,50

Eléments totaux	SiO_2	%	18,17	17,06	16,65
	CaO	%	0,36	0,17	0,17
	MgO	%	0,61	0,57	0,53
	K_2O	%	0,33	0,22	0,14
	Na_2O	%	0,24	0,17	0,16
	P_2O_5	%	0,58	0,37	0,29
	Fe_2O_3	%	21,20	22,21	22,55
	Al_2O_3	%	29,61	32,33	32,70
	TiO_2	%	4,59	4,90	4,93
	Mn	mg/kg	3749,37	3811,81	2876,25
	Cu	mg/kg	77,64	71,85	35,88
	Zn	mg/kg	216,32	245,69	212,75
	Pb	mg/kg	< 5,0	< 5,0	< 5,0
	Ni	mg/kg	85,88	87,80	71,13
	Cr	mg/kg	112,66	110,47	119,88
	As	mg/kg	4,85	5,24	3,94
	Co	mg/kg	42,68	49,87	40,57

Perte au feu (500°C)	%	20,15	17,16	16,85
-----------------------------	---	-------	-------	-------

Source : CIRAD 2002

Tableau 7 : Analyse de l'andosol des Colimaçons

ANNEXE 6 :
Tableau de résultats de la colonne 1

COLONNE 1

Date	Profondeur	O ₂ dissous	Eh (mV)	pH	Conductivité	Température	Fe2+ (g/l)	Nitrate (mg/l)
		(mg / l)			(uS / cm)	(°C)		
03/07/2003	95 cm	2,13	222	9,32	201	24,5	1,42E-05	NC
03/07/2003	BC	3,90	384	6,03	243	23,7	1,20E-05	NC
04/07/2003	95 cm	4,11	407	6,60	158	23,5	1,12E-05	NC
04/07/2003	BC	4,54	420	5,86	226	23,0	1,20E-05	NC
07/07/2003	BC	3,80	424	6,12	236	23,3	1,04E-05	118,56
07/07/2003	95 cm	1,44	502	5,95	147	24,4	1,05E-05	189,43
08/07/2003	BC	4,73	347	6,80	273	22,6	1,17E-05	83,16
08/07/2003	95 cm	2,56	506	6,06	148	22,7	1,17E-05	161,45
09/07/2003	BC	4,30	377	6,32	228	22,6	1,09E-05	83,16
09/07/2003	95 cm	2,80	473	6,03	177	23,8	1,11E-05	182,01
10/07/2003	BC	4,30	413	6,21	242	22,9	1,11E-05	79,55
10/07/2003	95 cm	2,65	420	6,02	180	24,0	1,08E-05	205,18
11/07/2003	95 cm	2,65	410	6,00	171	23,7	1,11E-05	104,03
11/07/2003	BC	3,61	485	5,75	220	23,4	1,11E-05	42,77
15/07/2003	7,5 cm	3,59	580	4,85	969	23,7	1,27E-05	557,09
15/07/2003	15 cm	3,01	568	5,25	631	23,5	1,29E-05	1055,72
15/07/2003	35 cm	2,18	579	5,75	111	23,1	1,20E-05	69,77
15/07/2003	95 cm	2,52	508	5,90	200	23,1	1,18E-05	155,13
15/07/2003	BC	3,21	499	5,80	215	22,5	1,17E-05	117,28
16/07/2003	95 cm	2,18	497	6,03	202	23,8	1,07E-05	260,77
16/07/2003	BC	3,45	507	5,80	224	23,2	1,11E-05	222,25
17/07/2003	95 cm	1,84	385	6,19	213	23,3	1,19E-05	213,55
18/07/2003	95 cm	3,08	463	6,12	202	23,4	1,17E-05	271,40
21/07/2003	BC	3,90	440	5,85	204	22,9	NC	155,13
21/07/2003	95 cm	2,80	484	5,86	192	23,8	NC	250,55
22/07/2003	95 cm	2,23	528	5,93	199	24,4	NC	168,03
22/07/2003	BC	3,44	511	5,78	207	23,9	NC	132,21
23/07/2003	95 cm	2,32	527	6,08	195	23,3	NC	182,01
23/07/2003	BC	3,54	524	5,73	204	23,7	NC	143,21
24/07/2003	95 cm	2,12	537	5,77	192	22,5	NC	205,18
25/07/2003	95 cm	2,42	527	5,74	196	22,8	NC	182,01
28/07/2003	95 cm	2,34	499	5,89	189	22,5	NC	282,46
28/07/2003	BC	5,31	487	5,90	199	22,2	NC	189,43
29/07/2003	7,5 cm	3,22	676	4,17	1144	22,9	NC	2983,22
29/07/2003	15 cm	2,59	635	5,47	524	24,0	NC	1847,01
29/07/2003	35 cm	3,02	623	5,43	215	23,2	NC	344,92
29/07/2003	95 cm	2,29	520	6,08	187	22,7	NC	535,28
29/07/2003	BC	3,23	527	5,90	196	22,3	NC	344,92
30/07/2003	35 cm	2,59	656	5,36	719	23,9	NC	974,65
30/07/2003	95 cm	2,23	516	6,25	182	23,6	NC	344,92

Tableau 8 : Résultat de la colonne 1 (1/2)

		Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Fe mg/l	Al mg/l	Mn mg/l	P mg/l	Si mg/l	Cu mg/l	Zn mg/l	Ti mg/l
03/07/2003	95 cm	18,71	2,13	0,12	6,50	0,12	<0.01	<0.01	0,01	1,29	<0.01	0,01	<0.01
03/07/2003	BC	22,02	2,48	0,14	9,34	0,14	<0.01	<0.01	0,02	1,27	<0.01	<0.01	<0.01
04/07/2003	95 cm	16,53	1,88	0,13	6,12	0,13	<0.01	<0.01	<0.01	1,40	<0.01	0,01	<0.01
04/07/2003	BC	23,06	2,61	0,15	9,74	0,15	<0.01	0,01	0,02	1,26	<0.01	<0.01	<0.01
07/07/2003	BC	22,72	2,56	0,15	10,43	0,15	<0.01	0,02	<0.01	1,23	<0.01	<0.01	<0.01
07/07/2003	95 cm	16,06	1,81	0,15	6,17	0,15	<0.01	<0.01	<0.01	1,28	<0.01	0,01	<0.01
08/07/2003	BC	22,19	2,50	0,18	10,35	0,18	<0.01	0,02	<0.01	1,24	<0.01	<0.01	<0.01
08/07/2003	95 cm	16,88	1,92	0,12	6,29	0,12	<0.01	<0.01	0,01	1,27	<0.01	0,01	<0.01
09/07/2003	BC	22,07	2,48	0,14	10,25	0,14	<0.01	0,02	<0.01	1,22	<0.01	<0.01	<0.01
09/07/2003	95 cm	18,08	2,05	0,12	6,47	0,12	<0.01	<0.01	<0.01	1,24	<0.01	0,01	<0.01
10/07/2003	BC	21,98	2,47	0,15	10,17	0,15	<0.01	0,02	<0.01	1,23	<0.01	<0.01	<0.01
10/07/2003	95 cm	18,06	2,05	0,11	6,51	0,11	<0.01	<0.01	<0.01	1,23	<0.01	<0.01	<0.01
11/07/2003	95 cm	17,65	2,00	0,10	6,46	0,10	<0.01	<0.01	0,01	1,27	<0.01	<0.01	<0.01
11/07/2003	BC	21,90	2,46	0,14	10,18	0,14	<0.01	0,02	<0.01	1,25	<0.01	<0.01	<0.01
15/07/2003	7,5 cm	56,26	11,11	1,85	32,88	1,85	0,12	0,15	0,01	6,36	<0.01	0,04	<0.01
15/07/2003	15 cm	59,49	13,00	1,05	17,04	1,05	0,12	0,14	<0.01	5,73	<0.01	0,08	<0.01
15/07/2003	35 cm	8,41	0,89	0,11	5,91	0,11	<0.01	<0.01	0,01	4,00	<0.01	<0.01	<0.01
15/07/2003	95 cm	22,17	2,50	0,12	7,36	0,12	0,01	0,01	<0.01	1,26	<0.01	<0.01	<0.01
15/07/2003	BC	21,25	2,39	0,24	9,98	0,24	<0.01	0,03	<0.01	1,24	<0.01	<0.01	<0.01
16/07/2003	95 cm	21,03	2,36	0,11	7,27	0,11	<0.01	0,02	0,01	1,27	<0.01	<0.01	<0.01
16/07/2003	BC	23,07	2,57	0,13	9,81	0,13	<0.01	0,03	0,01	1,27	<0.01	<0.01	<0.01
17/07/2003	95 cm	21,28	2,41	0,11	7,35	0,11	<0.01	0,01	0,02	1,29	<0.01	<0.01	<0.01
18/07/2003	95 cm	21,82	2,47	0,13	7,60	0,13	<0.01	0,01	<0.01	1,31	<0.01	<0.01	<0.01
21/07/2003	BC	20,41	2,29	0,14	9,57	0,14	<0.01	0,03	0,01	1,32	<0.01	<0.01	<0.01
21/07/2003	95 cm	20,73	2,36	0,12	7,35	0,12	<0.01	0,02	0,02	1,31	<0.01	<0.01	<0.01
22/07/2003	95 cm	21,46	2,41	0,12	7,55	0,12	<0.01	0,02	0,02	1,32	<0.01	<0.01	<0.01
22/07/2003	BC	21,11	2,36	0,16	9,64	0,16	<0.01	0,04	0,02	1,33	<0.01	<0.01	<0.01
23/07/2003	95 cm	21,13	2,38	0,13	7,42	0,13	<0.01	0,02	0,02	1,32	<0.01	<0.01	<0.01
23/07/2003	BC	21,17	2,35	0,25	9,77	0,25	<0.01	0,04	0,01	1,32	<0.01	<0.01	<0.01
24/07/2003	95 cm	21,10	2,38	0,12	7,65	0,12	<0.01	0,02	<0.01	1,30	<0.01	<0.01	<0.01
25/07/2003	95 cm	20,58	2,31	0,12	7,76	0,12	<0.01	0,03	<0.01	1,29	<0.01	<0.01	<0.01
28/07/2003	95 cm	20,09	2,24	0,11	7,26	<0.01	<0.01	0,02	<0.01	1,23	<0.01	<0.01	<0.01
28/07/2003	BC	19,07	2,12	0,12	9,24	<0.01	<0.01	0,04	<0.01	1,28	<0.01	<0.01	<0.01
29/07/2003	7,5 cm	67,47	10,94	8,84	14,39	<0.01	0,60	0,81	0,02	7,46	<0.01	0,05	<0.01
29/07/2003	15 cm	59,30	13,19	1,35	26,46	<0.01	0,13	0,15	0,02	5,28	<0.01	0,06	<0.01
29/07/2003	35 cm	29,74	3,12	0,22	14,98	<0.01	<0.01	0,02	0,02	4,05	<0.01	0,01	<0.01
29/07/2003	95 cm	19,71	2,19	0,12	6,91	<0.01	<0.01	0,02	0,02	1,25	<0.01	<0.01	<0.01
29/07/2003	BC	19,56	2,16	0,12	9,18	<0.01	<0.01	0,05	0,01	1,23	<0.01	<0.01	<0.01
30/07/2003	35 cm	54,27	5,91	0,49	50,98	<0.01	0,01	0,16	<0.01	4,25	<0.01	0,01	<0.01
30/07/2003	95 cm	18,76	2,06	0,13	6,75	<0.01	<0.01	0,03	<0.01	1,25	<0.01	<0.01	<0.01
30/07/2003	BC	21,05	2,30	0,13	9,18	<0.01	<0.01	0,05	<0.01	1,24	<0.01	<0.01	<0.01

Tableau 9 : Résultat se la colonne 1 (2/2)

ANNEXE 7 :
Tableau de résultats de la colonne 2

Date	Profondeur	O ₂ dissous	Eh (mV)	pH	Conductivité (uS / cm)	Température (°C)	Fe2+ (g/l)	Nitrate (mg/l)
		(mg / l)						
03/07/2003	95 cm	2,64	415	6,07	193	24,0	1,36E-05	NC
03/07/2003	BC	3,86	NC	7,30	188	24,0	1,34E-05	NC
04/07/2003	95 cm	2,00	422	5,90	140	23,8	1,21E-05	NC
04/07/2003	BC	4,00	434	6,09	145	23,2	1,20E-05	135,43
07/07/2003	95 cm	1,40	495	NC	139	23,7	1,09E-05	90,87
07/07/2003	BC	4,25	530	6,01	144	23,6	1,10E-05	66,63
08/07/2003	95 cm	2,20	500	6,03	159	24,1	1,12E-05	63,74
08/07/2003	BC	4,77	533	6,02	147	23,1	1,14E-05	58,33
09/07/2003	BC	4,40	415	6,07	156	23,1	1,17E-05	63,74
09/07/2003	95 cm	2,16	416	6,02	152	23,5	1,15E-05	66,63
10/07/2003	95 cm	2,73	460	5,92	149	23,8	1,08E-05	86,93
10/07/2003	BC	4,38	470	5,95	145	23,2	1,10E-05	58,33
11/07/2003	BC	4,20	500	5,90	149	23,2	1,16E-05	34,26
11/07/2003	95 cm	1,85	502	5,82	147	23,8	1,14E-05	35,82
15/07/2003	7,5 cm	2,70	492	5,32	735	24,2	1,07E-05	628,03
15/07/2003	15 cm	3,06	587	4,76	753	24,1	1,05E-05	628,03
15/07/2003	35 cm	3,64	561	5,48	103	23,8	1,35E-05	69,77
15/07/2003	95 cm	2,03	506	5,95	174	23,2	1,25E-05	122,06
15/07/2003	BC	2,72	501	5,63	149	22,6	1,25E-05	96,04
16/07/2003	95 cm	1,73	512	5,80	173	23,6	1,08E-05	222,25
16/07/2003	BC	4,24	505	5,90	184	23,1	1,09E-05	213,55
17/07/2003	95 cm	2,19	497	5,87	175	23,3	1,13E-05	260,77
18/07/2003	95 cm	2,18	513	5,90	169	23,6	1,20E-05	271,40
21/07/2003	95 cm	1,96	489	5,89	174	23,9	NC	182,01
21/07/2003	BC	3,92	493	5,83	167	23,8	NC	161,45
22/07/2003	BC	4,21	512	5,86	172	24,0	NC	161,45
22/07/2003	95 cm	2,09	518	5,77	174	24,5	NC	174,88
23/07/2003	95 cm	1,53	526	5,89	177	24,4	NC	197,15
23/07/2003	BC	4,46	521	5,85	176	23,4	NC	174,88
24/07/2003	95 cm	1,80	533	5,69	177	22,8	NC	182,01
25/07/2003	95 cm	1,72	527	5,71	176	23,0	NC	168,03
28/07/2003	95 cm	2,39	507	5,88	175	22,8	NC	282,46
28/07/2003	BC	4,80	508	5,91	178	22,2	NC	260,77
29/07/2003	7,5 cm	2,87	609	4,67	642	24,4	NC	1574,21
29/07/2003	15 cm	3,00	650	4,94	548	23,9	NC	1453,32
29/07/2003	35 cm	2,77	624	5,63	211	24,1	NC	474,81
29/07/2003	95 cm	2,25	517	5,95	177	23,2	NC	404,69
29/07/2003	BC	3,48	518	5,86	182	22,2	NC	373,61
30/07/2003	35 cm	3,08	619	5,53	356	24,3	NC	653,63
30/07/2003	95 cm	1,69	519	5,84	201	24,2	NC	438,35
30/07/2003	BC	4,45	524	5,90	208	23,2	NC	388,84

Tableau 10 : Résultat se la colonne 2 (1/2)

		Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Fe mg/l	Al mg/l	Mn mg/l	P mg/l	Si mg/l	Cu mg/l	Zn mg/l	Ti mg/l
03/07/2003	95 cm	15,67	1,58	0,14	5,60	0,14	<0.01	<0.01	0,01	1,26	< 0.01	< 0.01	< 0.01
03/07/2003	BC	14,84	1,48	0,13	5,88	0,13	<0.01	<0.01	0,02	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
04/07/2003	95 cm	16,06	1,61	0,12	5,66	0,12	<0.01	<0.01	< 0.01	1,30	< 0.01	< 0.01	< 0.01
04/07/2003	BC	15,03	1,50	0,08	5,79	0,08	<0.01	<0.01	< 0.01	1,21	< 0.01	< 0.01	< 0.01
07/07/2003	95 cm	16,47	1,66	0,13	5,81	0,13	<0.01	<0.01	< 0.01	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
07/07/2003	BC	15,12	1,51	0,09	5,96	0,09	<0.01	0,01	< 0.01	1,21	< 0.01	< 0.01	< 0.01
08/07/2003	95 cm	16,92	1,71	0,16	5,94	0,16	<0.01	<0.01	< 0.01	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
08/07/2003	BC	15,56	1,57	0,11	6,08	0,11	<0.01	0,01	< 0.01	1,20	< 0.01	< 0.01	< 0.01
09/07/2003	BC	15,03	1,51	0,09	5,91	0,09	<0.01	0,01	< 0.01	1,20	< 0.01	< 0.01	< 0.01
09/07/2003	95 cm	16,70	1,69	0,15	5,85	0,15	<0.01	<0.01	< 0.01	1,23	< 0.01	< 0.01	< 0.01
10/07/2003	95 cm	16,80	1,70	0,12	5,84	0,12	0,01	<0.01	0,01	1,22	< 0.01	< 0.01	< 0.01
10/07/2003	BC	15,20	1,52	0,19	6,05	0,19	<0.01	0,01	< 0.01	1,21	< 0.01	< 0.01	< 0.01
11/07/2003	BC	15,34	1,54	0,15	6,08	0,15	<0.01	0,01	0,01	1,22	< 0.01	< 0.01	< 0.01
11/07/2003	95 cm	17,17	1,74	0,12	6,00	0,12	<0.01	0,01	0,01	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
15/07/2003	7,5 cm	26,59	5,40	0,98	15,76	0,98	0,05	0,08	0,01	6,66	< 0.01	0,04	< 0.01
15/07/2003	15 cm	97,20	22,07	1,46	23,97	1,46	0,22	0,24	< 0.01	5,71	< 0.01	0,04	< 0.01
15/07/2003	35 cm	8,37	0,94	0,13	9,43	0,13	<0.01	<0.01	< 0.01	4,27	< 0.01	< 0.01	< 0.01
15/07/2003	95 cm	18,61	1,92	0,12	6,36	0,12	<0.01	0,02	0,01	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
15/07/2003	BC	15,32	1,53	0,08	6,05	0,08	<0.01	0,02	< 0.01	1,20	< 0.01	< 0.01	< 0.01
16/07/2003	95 cm	20,33	2,07	0,11	6,58	0,11	<0.01	0,02	< 0.01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
16/07/2003	BC	19,95	2,00	0,24	7,43	0,24	<0.01	0,02	< 0.01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
17/07/2003	95 cm	20,34	2,07	0,11	6,61	0,11	<0.01	0,02	0,01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
18/07/2003	95 cm	20,45	2,08	0,13	6,69	0,13	<0.01	0,02	< 0.01	1,27	< 0.01	< 0.01	< 0.01
21/07/2003	95 cm	19,55	1,98	0,12	6,43	0,12	<0.01	0,02	0,01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
21/07/2003	BC	18,47	1,86	0,19	6,74	0,19	<0.01	0,02	0,01	1,27	< 0.01	< 0.01	< 0.01
22/07/2003	BC	19,08	1,91	0,11	6,94	0,11	<0.01	0,02	0,02	1,29	< 0.01	< 0.01	< 0.01
22/07/2003	95 cm	20,01	2,04	0,11	6,63	0,11	<0.01	0,02	0,02	1,28	< 0.01	< 0.01	< 0.01
23/07/2003	95 cm	19,34	1,97	0,12	6,56	0,12	<0.01	0,02	0,02	1,27	< 0.01	< 0.01	< 0.01
23/07/2003	BC	19,49	1,95	0,11	7,11	0,11	<0.01	0,02	< 0.01	1,27	< 0.01	< 0.01	< 0.01
24/07/2003	95 cm	19,85	2,02	0,11	6,62	0,11	<0.01	0,03	< 0.01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
25/07/2003	95 cm	19,23	1,96	0,11	6,47	0,11	<0.01	0,03	< 0.01	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
28/07/2003	95 cm	19,33	1,94	0,12	6,29	<0.01	<0.01	0,03	< 0.01	1,19	< 0.01	< 0.01	< 0.01
28/07/2003	BC	19,32	1,92	0,11	6,74	<0.01	<0.01	0,02	< 0.01	1,22	< 0.01	< 0.01	< 0.01
29/07/2003	7,5 cm	34,30	6,11	2,16	9,21	<0.01	0,09	0,19	0,01	6,93	< 0.01	0,03	< 0.01
29/07/2003	15 cm	59,83	13,14	1,34	27,51	<0.01	0,15	0,17	0,02	5,37	< 0.01	0,02	< 0.01
29/07/2003	35 cm	32,79	3,35	0,26	23,34	<0.01	<0.01	0,01	0,03	4,12	< 0.01	0,01	< 0.01
29/07/2003	95 cm	19,51	1,98	0,11	6,30	<0.01	<0.01	0,03	0,02	1,19	< 0.01	< 0.01	< 0.01
29/07/2003	BC	20,11	2,02	0,20	7,06	<0.01	0,01	0,03	0,02	1,26	< 0.01	< 0.01	< 0.01
30/07/2003	35 cm	41,73	4,14	0,37	41,90	<0.01	<0.01	0,01	< 0.01	4,19	< 0.01	0,02	< 0.01
30/07/2003	95 cm	22,55	2,27	0,13	6,93	<0.01	<0.01	0,04	< 0.01	1,21	< 0.01	< 0.01	< 0.01
30/07/2003	BC	22,96	2,26	0,12	7,85	<0.01	<0.01	0,03	< 0.01	1,21	< 0.01	< 0.01	< 0.01

Tableau 11 : Résultat se la colonne 2 (2/2)

ANNEXE 8 :
Tableau de résultats de la colonne 3

Date	Profondeur	O ₂ dissous	Eh (mV)	pH	Conductivité (uS / cm)	Température (°C)	Fe2+ (g/l)	Nitrate (mg/l)
		(mg / l)						
03/07/2003	95 cm	5,46	343	6,53	173	24,0	1,12E-05	NC
03/07/2003	BC	4,69	309	9,35	296	24,1	1,10E-05	NC
04/07/2003	95 cm	1,90	468	5,96	141	24,3	1,24E-05	63,74
04/07/2003	BC	3,56	450	6,20	230	23,2	1,07E-05	141,57
07/07/2003	BC	2,80	539	5,82	247	23,4	1,11E-05	94,99
07/07/2003	95 cm	1,21	557	5,90	143	24,1	1,08E-05	63,74
08/07/2003	BC	2,79	515	5,99	247	23,5	1,13E-05	90,87
08/07/2003	95 cm	1,96	491	5,90	204	24,1	1,11E-05	94,99
09/07/2003	95 cm	2,40	400	5,82	195	23,5	1,36E-05	83,16
09/07/2003	BC	3,85	385	5,96	248	22,8	1,11E-05	169,03
10/07/2003	95 cm	1,88	475	5,82	192	23,6	1,14E-05	94,99
10/07/2003	BC	2,41	486	5,81	245	23,5	1,17E-05	135,43
11/07/2003	95 cm	1,53	505	5,75	193	23,9	1,14E-05	48,85
11/07/2003	BC	2,34	503	5,85	247	23,5	1,16E-05	55,80
15/07/2003	7,5 cm	2,60	530	5,50	60	24,0	1,05E-05	33,99
15/07/2003	15 cm	3,28	549	5,24	105	23,9	1,11E-05	122,06
15/07/2003	35 cm	3,44	525	5,70	104	24,3	1,59E-05	88,67
15/07/2003	95 cm	1,48	440	5,80	213	24,3	1,09E-05	122,06
15/07/2003	BC	1,58	376	5,75	239	23,5	1,07E-05	143,21
16/07/2003	95 cm	2,02	508	5,74	253	23,9	1,13E-05	293,97
16/07/2003	BC	1,23	500	5,73	243	22,8	1,21E-05	250,55
17/07/2003	95 cm	1,64	510	5,83	233	23,5	1,21E-05	331,41
18/07/2003	95 cm	1,68	512	5,70	222	23,6	NC	358,97
21/07/2003	95 cm	2,06	502	5,73	225	24,5	NC	231,31
21/07/2003	BC	4,45	489	5,88	234	24,2	NC	161,45
22/07/2003	95 cm	2,15	514	5,75	239	24,6	NC	250,55
22/07/2003	BC	2,89	504	5,74	230	24,4	NC	189,43
23/07/2003	95 cm	1,78	526	5,84	224	24,1	NC	231,31
23/07/2003	BC	2,91	519	5,74	230	24,0	NC	189,43
24/07/2003	95 cm	2,00	532	5,59	224	23,0	NC	240,74
25/07/2003	95 cm	2,03	525	5,67	223	23,3	NC	250,55
28/07/2003	95 cm	1,90	514	5,93	214	23,8	NC	344,92
28/07/2003	BC	3,72	494	5,82	243	22,6	NC	231,31
29/07/2003	7,5 cm	2,88	574	5,44	77	24,5	NC	104,03
29/07/2003	15 cm	3,15	585	5,37	87	24,0	NC	149,05
29/07/2003	35 cm	3,50	586	5,50	208	24,5	NC	318,43
29/07/2003	95 cm	1,87	518	5,79	204	24,2	NC	404,69
29/07/2003	BC	1,83	513	5,81	237	23,8	NC	404,69
30/07/2003	35 cm	2,86	577	5,56	138	25,0	NC	189,43
30/07/2003	95 cm	2,09	480	5,67	231	24,8	NC	557,09
30/07/2003	BC	2,15	494	5,81	237	23,9	NC	456,22

Tableau 12 : Résultat se la colonne 3 (1/2)

		Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Fe mg/l	Al mg/l	Mn mg/l	P mg/l	Si mg/l	Cu mg/l	Zn mg/l	Ti mg/l
03/07/2003	95 cm	12,94	1,44	0,11	5,19	0,11	<0.01	<0.01	0,02	1,32	< 0.01	< 0.01	< 0.01
03/07/2003	BC	23,45	2,55	0,31	9,36	0,31	0,01	<0.01	0,12	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
04/07/2003	95 cm	13,18	1,45	0,09	5,26	0,09	<0.01	<0.01	< 0.01	1,34	< 0.01	< 0.01	< 0.01
04/07/2003	BC	24,12	2,63	0,12	9,68	0,12	<0.01	<0.01	0,02	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
07/07/2003	BC	25,73	2,82	0,13	10,26	0,13	<0.01	0,01	< 0.01	1,26	< 0.01	< 0.01	< 0.01
07/07/2003	95 cm	14,85	1,61	0,09	5,84	0,09	<0.01	0,01	< 0.01	1,29	< 0.01	< 0.01	< 0.01
08/07/2003	BC	25,68	2,80	0,16	10,39	0,16	<0.01	0,02	< 0.01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
08/07/2003	95 cm	20,55	2,20	0,11	8,23	0,11	<0.01	0,02	< 0.01	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
09/07/2003	95 cm	21,41	2,28	0,11	8,73	0,11	<0.01	0,02	< 0.01	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
09/07/2003	BC	25,26	2,74	0,24	10,34	0,24	<0.01	0,02	< 0.01	1,23	< 0.01	< 0.01	< 0.01
10/07/2003	95 cm	21,96	2,34	0,12	8,95	0,12	<0.01	0,02	< 0.01	1,23	< 0.01	< 0.01	< 0.01
10/07/2003	BC	25,36	2,76	0,12	10,34	0,12	<0.01	0,02	< 0.01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
11/07/2003	95 cm	21,74	2,32	0,11	8,90	0,11	<0.01	0,02	< 0.01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
11/07/2003	BC	24,99	2,71	0,11	10,35	0,11	<0.01	0,02	< 0.01	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
15/07/2003	7,5 cm	3,32	0,71	0,24	3,15	0,24	<0.01	<0.01	< 0.01	5,10	< 0.01	< 0.01	< 0.01
15/07/2003	15 cm	7,23	1,55	0,35	4,55	0,35	<0.01	0,02	< 0.01	5,41	< 0.01	0,01	< 0.01
15/07/2003	35 cm	7,74	0,78	0,16	7,72	0,16	0,01	<0.01	< 0.01	4,21	< 0.01	< 0.01	< 0.01
15/07/2003	95 cm	21,79	2,36	0,11	8,07	0,11	<0.01	0,03	< 0.01	1,23	< 0.01	< 0.01	< 0.01
15/07/2003	BC	24,33	2,63	0,15	10,78	0,15	0,01	0,03	0,01	1,23	< 0.01	< 0.01	< 0.01
16/07/2003	95 cm	26,37	2,84	0,12	9,54	0,12	<0.01	0,03	< 0.01	1,27	< 0.01	< 0.01	< 0.01
16/07/2003	BC	25,72	2,76	0,20	10,62	0,20	<0.01	0,03	< 0.01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
17/07/2003	95 cm	26,01	2,80	0,12	9,49	0,12	<0.01	0,03	< 0.01	1,27	< 0.01	< 0.01	< 0.01
18/07/2003	95 cm	26,42	2,84	0,12	9,79	0,12	<0.01	0,03	< 0.01	1,28	< 0.01	< 0.01	< 0.01
21/07/2003	95 cm	24,67	2,65	0,13	9,17	0,13	<0.01	0,04	< 0.01	1,27	< 0.01	< 0.01	< 0.01
21/07/2003	BC	22,94	2,46	0,14	10,43	0,14	<0.01	0,04	< 0.01	1,31	< 0.01	< 0.01	< 0.01
22/07/2003	95 cm	25,22	2,71	0,12	9,56	0,12	<0.01	0,04	0,02	1,30	< 0.01	< 0.01	< 0.01
22/07/2003	BC	23,85	2,56	0,19	10,41	0,19	<0.01	0,04	0,01	1,30	< 0.01	< 0.01	< 0.01
23/07/2003	95 cm	24,93	2,67	0,12	9,55	0,12	<0.01	0,04	0,02	1,29	< 0.01	< 0.01	< 0.01
23/07/2003	BC	23,98	2,56	0,31	10,67	0,31	<0.01	0,04	0,02	1,29	< 0.01	< 0.01	< 0.01
24/07/2003	95 cm	24,29	2,61	0,12	9,26	0,12	<0.01	0,04	< 0.01	1,27	< 0.01	< 0.01	< 0.01
25/07/2003	95 cm	23,05	2,48	0,11	8,87	0,11	<0.01	0,04	< 0.01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01
28/07/2003	95 cm	22,21	2,36	0,11	8,96	<0.01	<0.01	0,04	< 0.01	1,21	< 0.01	< 0.01	< 0.01
28/07/2003	BC	22,96	2,44	0,19	11,09	<0.01	<0.01	0,05	0,01	1,41	< 0.01	< 0.01	< 0.01
29/07/2003	7,5 cm	3,52	0,77	0,24	3,18	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	4,96	< 0.01	< 0.01	< 0.01
29/07/2003	15 cm	5,72	1,25	0,32	3,85	<0.01	<0.01	0,02	< 0.01	5,17	< 0.01	0,01	< 0.01
29/07/2003	35 cm	15,82	1,54	0,21	16,02	<0.01	<0.01	<0.01	0,02	4,06	< 0.01	< 0.01	< 0.01
29/07/2003	95 cm	20,61	2,21	0,11	8,01	<0.01	<0.01	0,04	0,02	1,30	< 0.01	< 0.01	< 0.01
29/07/2003	BC	23,90	2,54	0,18	10,71	<0.01	<0.01	0,05	0,01	1,22	< 0.01	< 0.01	< 0.01
30/07/2003	35 cm	11,65	1,17	0,11	5,85	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	4,20	< 0.01	< 0.01	< 0.01
30/07/2003	95 cm	24,71	2,64	0,13	8,87	<0.01	<0.01	0,05	< 0.01	1,24	< 0.01	< 0.01	< 0.01
30/07/2003	BC	24,00	2,53	0,13	10,35	<0.01	<0.01	0,05	< 0.01	1,25	< 0.01	< 0.01	< 0.01

Tableau 13 : Résultat se la colonne 3 (2/2)

ANNEXE 9 :
Loi d'étalonnage des sondes TDR CS616

La loi d'étalonnage mise au point à partir de mesures en laboratoire sur l'andosol des Colimaçons est :

$$\theta = \alpha - \frac{\beta}{T - T_0} \quad \text{si} \quad 20 \leq T \leq T_{\text{lim}}$$

$$\theta = \alpha - \frac{\beta}{T_{\text{lim}} - T_0} + \gamma(T - T_{\text{lim}}) \quad \text{si} \quad T \geq T_{\text{lim}}$$

avec θ , humidité volumique du sol ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) T , période brute mesurée par la sonde TDR (μs), $T_0=36.74 \mu\text{s}$, $T_{\text{lim}}=28.96 \mu\text{s}$, $\alpha=-27.91 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $\beta=625.38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \mu\text{s}$ et $\gamma=3.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \mu\text{s}^{-1}$, paramètres d'ajustements.

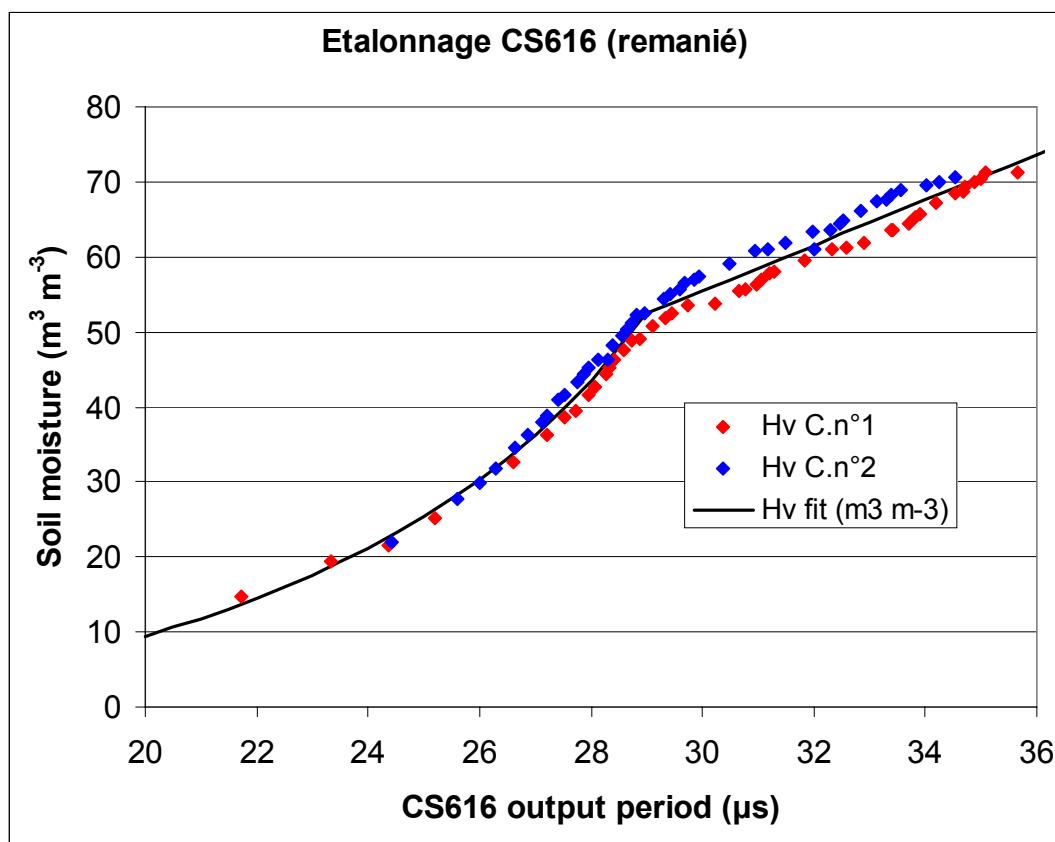


Figure 15 : Ajustement de la loi d'étalonnage (Hv fit) aux mesures de laboratoire