



**Observation et quantification
des principaux processus gouvernant
le fonctionnement hydrologique
du système sol-bananier
sur andosol de Guadeloupe,
à l'échelle locale de la placette**

Rapport de stage du
DESS Hydrogéologie et Environnement
Université d'Avignon et des pays du Vaucluse
Jennifer MARTIN
2003-2004

Encadrants :

Stéphane RUY, INRA CSE Avignon

Philippe CATTAN, CIRAD FHLOR Station Neufchâteau, Guadeloupe

Antoine FINDELING, CIRAD AMI Montpellier

Yves-Marie CABIDOUCHE, INRA APC Domaine Duclos, Guadeloupe

REMERCIEMENTS

L'encadrement scientifique dont j'ai bénéficié était exceptionnel. Je tiens à remercier profondément Philippe Cattan pour les nombreuses heures qu'il m'a consacrées et pour sa patience lors de mes fréquentes interventions dans son bureau. Merci à Stéphane Ruy et à Antoine Findeling pour leur aide technique lors de l'installation de l'expérience ainsi que pour les nombreuses relectures de mon rapport et leurs conseils avisés. Je tiens également à remercier Yves-Marie Cabidoche pour ses remarques pertinentes lors de nos brèves rencontres et la supervision de mon stage par de nombreux intermédiaires. Je n'ai pas douté une seconde de sa disponibilité et de son attention à mon égard.

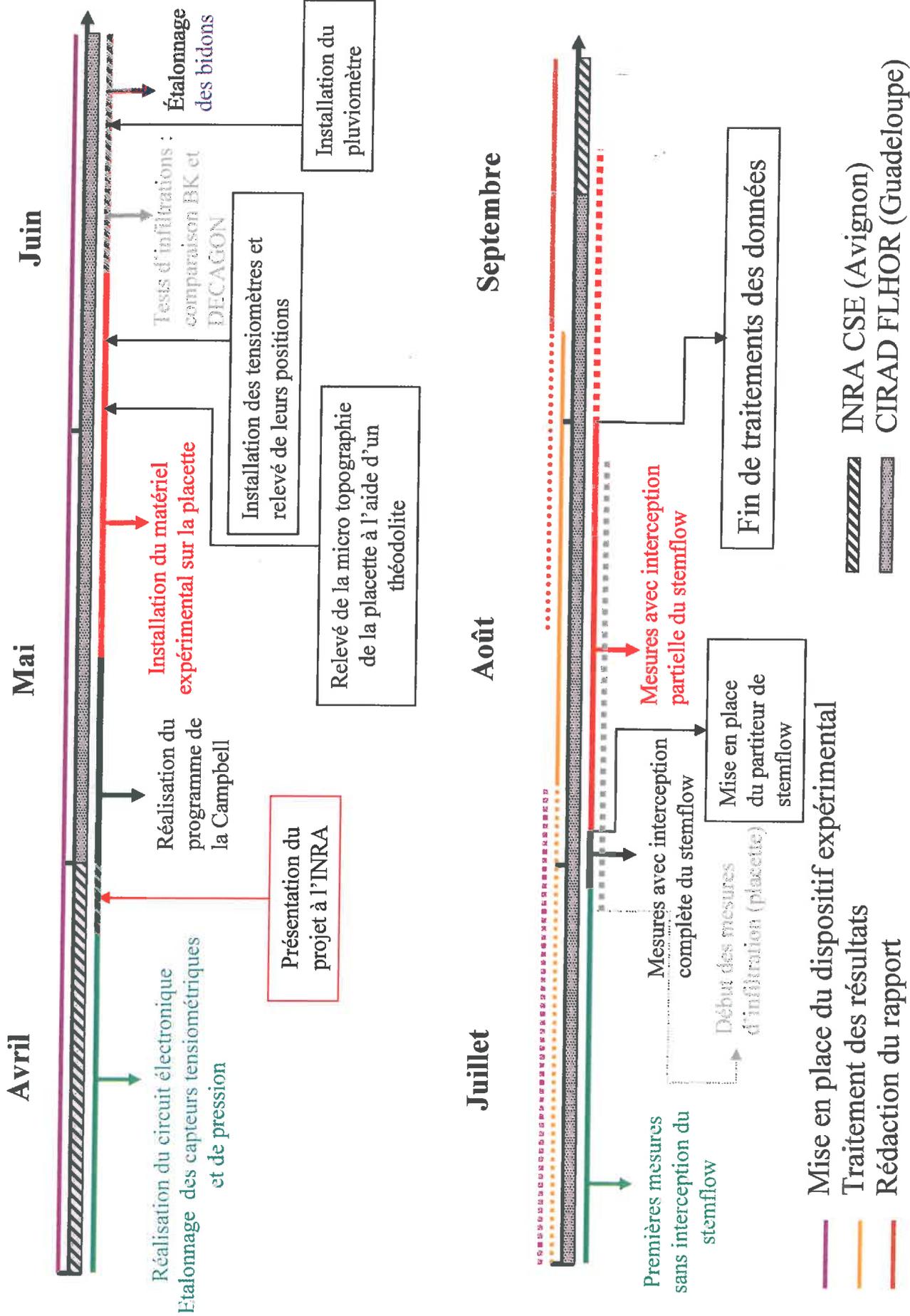
Je remercie donc tous ces intermédiaires qui faisaient les allers-retours INRA/CIRAD pour venir m'aider puis qui donnaient de mes nouvelles à Y.M Cabidoche : François Bussière (installation du partiteur), Thierry Bajazet (« dépannage électronique ») et surtout Julie Sansoulet. Julie m'a aidée sur de nombreux aspects de mon stage – aide technique et scientifique (combien de soirées et de week-end passés à parler d'infiltration et de ruissellement ?!) - mais elle a surtout été une amie précieuse et une confidente, je suis heureuse de l'avoir rencontrée. J'espère que la suite de sa thèse se déroulera comme elle le souhaite.

Je ne sais pas si le dispositif expérimental aurait été fini un jour sans l'aide de Jules. Il a su me redonner une motivation au moment où le travail sur le terrain devenait difficile à gérer toute seule et il m'a aidé à installer le dispositif par une aide technique de qualité mais également en instaurant un climat de confiance entre les techniciens de l'atelier et moi, ce qui m'a permis de bricoler avec leur aide. Je tiens d'ailleurs à les remercier tous. Merci également à Jules pour son soutien lors de soucis plus personnels.

Je remercie encore Dominique Renard, avec qui j'ai passé de nombreuses heures lors de la réalisation du circuit électronique, des étalonnages et de la réalisation du programme de la Campbell. Grâce à lui, je suis devenue une professionnelle de la soudure électronique et du circuit imprimé !

Merci enfin à Jean-Baptiste Charlier pour ses bons conseils et pour les petits problèmes résolus avec son aide lorsque Philippe Cattan n'était pas présent.

Déroulement du stage



SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
1. CADRE DE L'ETUDE	5
1.1. LA GUADELOUPE	5
1.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU CIRAD.....	6
1.3. LES ANDOSOLS	6
1.4. LE BANANIER.....	6
1.5. LA REDISTRIBUTION DE LA PLUIE SOUS BANANERAIE	7
1.5.1. <i>Incidence des flux entrants</i>	7
1.5.2. <i>Evolution de l'infiltrabilité en relation avec l'état de surface</i>	8
1.6. OBJECTIFS DE L'EXPERIENCE	8
2. MATERIELS ET METHODES	9
2.1. LA PARCELLE EXPERIMENTALE.....	9
2.1.1. <i>La parcelle</i>	9
2.1.2. <i>Le sol</i>	9
2.1.3. <i>Présentation du dispositif expérimental</i>	10
2.2. LES MESURES.....	12
2.2.1. <i>Micro topographie</i>	12
2.2.2. <i>Mesures des flux entrants</i>	13
2.2.3. <i>Mesures des flux sortants</i>	14
2.2.4. <i>Mesures des potentiels matriciels</i>	16
2.3. FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	17
2.3.1. <i>Description générale</i>	17
2.3.2. <i>Composition du dispositif électronique</i>	17
2.3.3. <i>Fonctionnement du dispositif électronique</i>	18
2.3.4. <i>Pas de temps d'acquisition des données</i> :	19
2.4. CARACTERISATION DE LA VARIABILITE SPATIALE DE L'INFILTRATION	19
2.4.1. <i>Objectifs et méthodes employées</i>	19
2.4.2. <i>Infiltromètre à charge nulle de type « Beer-Kan »</i>	20
2.4.3. <i>Infiltromètre à succion de type Decagon</i>	22
2.4.4. <i>Plan d'expérience</i>	24
2.5. LES ETALONNAGES	26
2.5.1. <i>Etalonnages des capteurs tensiométriques SDEC SKT850T et des capteurs de pression ICSensors Modèle 84</i>	26
2.5.2. <i>Etalonnages des bidons et du bac de ruissellement munis de capteurs</i>	27
2.5.3. <i>Etalonnages du partiteur de stemflow</i>	27
2.6. ACQUISITION AUTOMATIQUE ET CALENDRIER D'INTERVENTION.....	28
2.6.1. <i>Acquisition et traitements des données</i>	28
2.6.2. <i>Calendrier d'interventions</i>	28

3. PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION	29
3.1. CONDITIONS PLUVIOMETRIQUES.....	29
3.2. CARACTERISATION PHYSIQUE.....	29
3.2.1. <i>Présentation de la micro topographie</i>	29
3.2.2. <i>Evolution des états de surface</i>	30
3.2.3. <i>Paramètres hydrodynamiques et structuraux</i>	33
3.3. ETUDE DYNAMIQUE DES FLUX D'EAU	36
3.3.1. <i>Présentation des événements pluvieux étudiés</i>	37
3.3.2. <i>Etudes des valeurs de potentiels matriciels sur trois évènements pluvieux</i>	38
3.3.3. <i>Typologie de l'évolution des potentiels matriciels au cours d'une pluie</i>	39
3.3.4. <i>Mise en évidence de l'influence du stemflow sur le drainage</i>	43
3.3.5. <i>Mise en évidence d'un drainage latéral</i>	43
3.3.6. <i>Mise en évidence du ruissellement</i>	46
3.3.7. <i>Etude des temps de réponse et des temps de montée des flux de drainage et de ruissellement</i>	48
3.4. SYNTHÈSE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE GLOBAL DE LA PLACETTE.....	50
CONCLUSION.....	52
BIBLIOGRAPHIE	54

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Figures :

- Figure 1** : Différenciation des horizons A et B dans un profil d'andosol - Parcelle " Espérance Haut "
- Figure 2** : Dispositif général de la placette
- Figure 3** : Schéma de la prise de coordonnées sur la placette
- Figure 4** : Dispositif d'interception du stemflow
- Figure 5** : Schéma d'un bidon muni d'un capteur de pression
- Figure 6** : Schéma du bac de ruissellement
- Figure 7** : Infiltromètre de type Decagon
- Figure 8** : Calcul des paramètres K_{jk} , K_{kl} et α_{jk} , α_{kl} pour l'estimation de $K(h_k)$
- Figure 9** : Emplacements des mesures d'infiltrométrie
- Figure 10** : Présentation de la micro topographie de la placette
- Figure 11** : Formation de cratères à la surface de la placette (29/07/04)
- Figure 12** : Aspect remanié du sol au pied du bananier (29/07/04)
- Figure 13** : Evolution de l'état de surface du sol de la placette
- Figure 14** : Photographie prise lors d'un événement pluvieux
- Figure 15** : Relation Beer-Kan / Decagon
- Figure 16** : Valeurs de conductivité hydraulique obtenues par la méthode Beer-Kan
- Figure 17** : Répartition des valeurs de conductivité hydraulique
- Figure 18** : Répartition des valeurs de potentiels matriciels en fonction de la profondeur pour l'ensemble des épisodes PM1, PM2 et PM3
- Figure 19** : Types d'évolution de courbes pendant une pluie
- Figure 20** : types de réponse des tensiomètres en fonction de la profondeur et de l'événement
- Figure 21** : Courbes de variations des potentiels matriciels des lysimètres 1, 2 et 3 et à l'exutoire lors de trois événements pluvieux
- Figure 22** : Etude de la répartition des potentiels matriciels de surface au cours d'événements pluvieux
- Figure 23** : schéma explicatif d'une composante horizontale du transfert d'eau dans le sol
- Figure 24** : Influence du stemflow sur les lames d'eau drainées à l'aplomb du bananier et immédiatement en aval
- Figure 25** : Influence du stemflow sur le ruissellement en fonction de la lame d'eau précipitée
- Figure 26** : Influence du stemflow sur le ruissellement en fonction de l'intensité pluvieuse
- Figure 27** : Hiétoigrammes et hydrogrammes de drainage et de ruissellement
- Figure 28** : Proposition de chronologie du fonctionnement hydrologique distribué

Tableaux :

- Tableau 1** : Tableau de comparaison des données pluviométriques entre les deux pluviomètres de la parcelle.
- Tableau 2** : Paramètres hydrodynamiques et structuraux mesurés sur andosol à proximité de la placette
- Tableau 3** : valeurs des conductivités hydrauliques à saturation par Decagon dans la placette
- Tableau 4** : Evénements pluvieux retenus pour l'étude des potentiels matriciels
- Tableau 5** : Evénements pluvieux retenus pour l'étude du drainage et du ruissellement
- Tableau 6** : Valeurs des temps de réponse et de montée pour les trois événements pluvieux étudiés

Introduction

La profession bananière guadeloupéenne est actuellement confrontée à divers problèmes tels que la faible productivité, la concurrence et la pression de plus en plus sensible des consommateurs et des pouvoirs publics pour une production plus respectueuse de l'environnement. La pratique de systèmes de cultures basés sur des apports massifs d'intrants (400 kg N/ha/an et 18 kg/ha/an de matières actives pesticides) et sur la mécanisation lourde, ne permet plus à la culture bananière guadeloupéenne de s'inscrire dans une perspective de durabilité. Le facteur « environnement » doit être pris en compte et les pratiques agricoles doivent être modifiées. En effet, le climat tropical humide où se développe la bananeraie (de 2.5 à 4.5 m d'eau par an) peut générer un ruissellement qui semble être la principale cause de l'entraînement des sols et des produits phytosanitaires hors des parcelles.

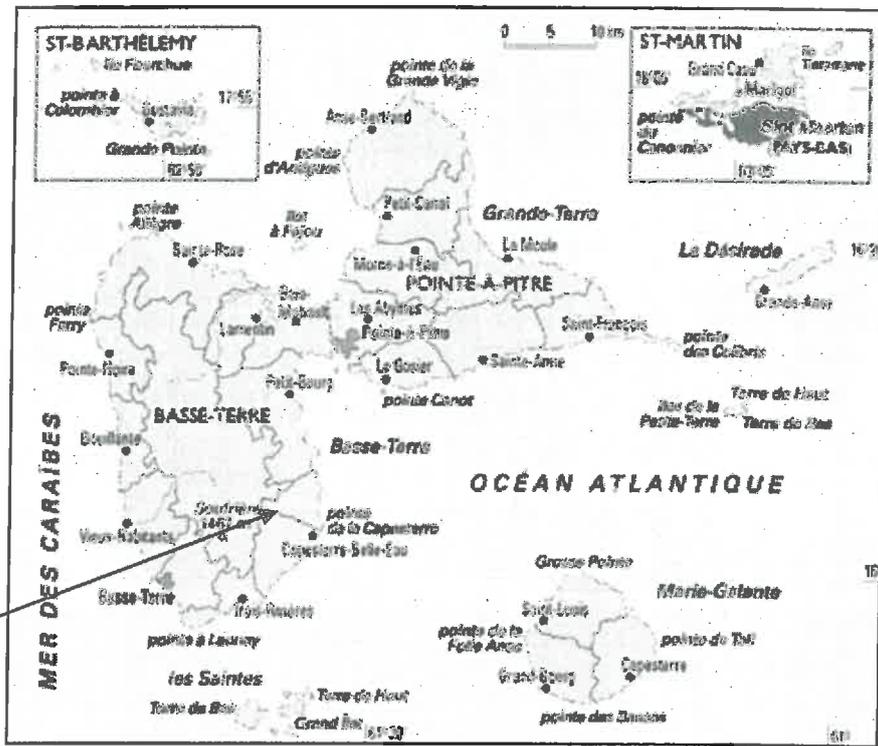
Les andosols, où sont implantées les bananeraies, ont une forte capacité d'infiltration et tolèrent facilement des régimes hydriques importants. Cependant, au niveau du sol, sous bananeraie, les précipitations subissent une redistribution spatiale par le couvert végétal entraînant une forte hétérogénéité des lames d'eau incidentes. Cette hétérogénéité est d'autant plus marquée que les flux d'infiltration et de ruissellement sont dépendants de la répartition spatiale des propriétés hydrodynamiques du sol. Ces flux d'eau localement très intenses sont responsables d'un fort ruissellement et d'une érosion localement marquée, qui induisent un risque de pollution par entraînement des apports en fertilisants et produits phytosanitaires.

En conséquence, la description des processus conduisant aux flux d'infiltration et de ruissellement à l'échelle d'une parcelle dépend d'une meilleure analyse des phénomènes engendrés par la pluie incidente, ainsi que d'une approche détaillée des propriétés hydrodynamiques des andosols d'origine volcanique de Guadeloupe.

Ce stage s'intègre dans un programme plus vaste d'analyse et de modélisation de l'impact des cultures bananières intensives sur les flux de substances polluantes (nitrates, pesticides) associés au ruissellement concentré et au drainage vers les nappes. L'objet du stage est d'évaluer l'influence de la redistribution de l'eau de pluie par le bananier et de l'hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques de surface sur le ruissellement, l'infiltration et le drainage, au moyen d'une analyse dynamique des flux. Les données recueillies serviront ultérieurement à développer un modèle mécaniste de ce fonctionnement hydrologique.

1. Cadre de l'étude

1.1. La guadeloupe



Source : Regiemarkes, 2001

La Guadeloupe est divisée en deux îles aux caractéristiques géologiques et climatiques assez différentes :

La Grande-Terre se caractérise par l'importance des formations calcaires plates et basses. L'existence de quelques beaux accidents tectoniques bien marqués délimite des ensembles géomorphologiques variés.

Exclusivement volcanique, **la Basse-Terre**, sur laquelle est située le Cirad, est formée par l'adjonction d'édifices plus ou moins bien individualisés. Du Pliocène à l'époque actuelle ces derniers se sont successivement implantés du Nord au Sud. Le volcanisme d'arc, donc acide par contamination du magma, fournit un matériel lavique assez homogène alliant des labradorites aux dacites. Les différences de démantèlement d'édifices ayant à peu près toujours associé phases explosives et phases effusives introduiront les nuances régionales entre un Nord plus ancien (Pliocène) et un Sud plus récent (Quaternaire).

Le climat de la Guadeloupe est de type tropical insulaire, chaud et humide. Le rayonnement global, quasiment constant toute l'année, est toujours suffisant pour la photosynthèse mais impose aux plantes une forte demande évaporative. La température moyenne annuelle est de 25°C, les maxima variant autour de 30°C. L'amplitude moyenne annuelle n'est que de 3°C. L'humidité atmosphérique est comprise entre 60% et 100%.

1.2. Situation géographique du Cirad

La station de Neuf-château se situe à 250 m d'altitude, sur la côte « sous le vent » au sud-est de la Basse Terre, à Capesterre-Belle-eau. Compte tenu de sa situation géographique, elle est soumise à d'importantes précipitations (3 600 mm par an). La température moyenne journalière est de 24,8°C et l'humidité moyenne avoisine les 85 %. Le climat de la station est représentatif de celui de la bananeraie guadeloupéenne en général.

1.3. Les andosols

Les andosols sont des sols de couleur foncée, formés à partir de matériaux volcaniques pyroclastiques (cendres, lapillis, ponces et tufs) d'âge récent (Nanzyo et al., 1993), sous climat humide (souvent tropical). Ces sols situés dans des régions à forte pluviométrie ne se dessèchent jamais. L'altération des matériaux volcaniques due à un fort taux d'humidité entraîne une teneur élevée en un gel amorphe de silice et d'alumine (allophane).

Les andosols ont une faible masse volumique et une forte porosité (70 à 80%) constituée essentiellement de micropores constamment saturés d'eau. Ils présentent naturellement une structure favorable à l'enracinement du bananier (forte réserve en eau, bonne aération).

1.4. Le bananier

Le bananier est une plante herbacée, originaire d'Extrême-Orient, vivace, monocotylédone du genre *Musa* et appartenant à la famille des Musacées. Sur la parcelle expérimentale Espérance-Haut, les bananiers cultivés « Grande Naine » appartiennent au sous-groupe Cavendish (ou Sinensis). C'est une plante de climat tropical humide qui apprécie une hygrométrie élevée, un bon ensoleillement et craint le vent et les brusques changements de températures (SICA ASSO BAG, 1987). Les besoins hydriques d'un bananier en croissance normale sont de l'ordre de 120 à 150 mm/mois.

La surface foliaire ou LAI (Leaf Area Index) influence majoritairement la redistribution de l'eau dans le sol, comme l'ont montré Bui et Box (1992) sur le maïs. Il est donc nécessaire d'analyser son évolution au cours du développement du bananier. Le LAI maximum est

atteint, sur la station de Neuf-château, 6 mois après la plantation, au stade « floraison ». La variation la plus importante du LAI se situant entre 3,5 mois et 5,5 mois (stade « préfloraison ») ; il passe de 1 à 3. Quinze à trente feuilles fonctionnelles sont produites avant la jetée de la hampe florale.

1.5. La redistribution de la pluie sous bananeraie

1.5.1. Incidence des flux entrants

1.5.1.1. Le stemflow

Le couvert végétal de la bananeraie est responsable de deux phénomènes impliquant une redistribution au sol de la pluie incidente : l'égouttage le long des feuilles du bananier, et une concentration des précipitations le long du faux-tronc de la plante (le stemflow).

Le stemflow est défini comme étant la **quantité de pluie interceptée par la plante qui s'écoule le long du tronc ou de la tige et qui atteint le sol** (Van Elewijck, 1989). D'après Parkin et Codling (1990), les variables les plus susceptibles d'agir sur le stemflow sont les suivantes : l'intensité de la pluie incidente, la durée de la pluie, le LAI, la direction et la taille des feuilles et le développement global de la canopée. D'après l'expérience menée en 1999 par F. Bussière, P. Catttan et A. Nouvellon, la surface foliaire, ainsi que l'angle formé entre les feuilles et le tronc sont les paramètres qui semblent les plus corrélés avec le stemflow. La relation permettant d'évaluer le stemflow à partir du LAI est la suivante (Cattan et al., 2003) :

$$V_{\text{stem}} = 11,2 * \text{LAI} * V_{\text{pluie}}$$

Cette relation est valable pour un LAI variant de 2 à 5.

1.5.1.2. Le gouttage

La pénétration des gouttes d'eau au travers d'une canopée ayant une répartition de ses feuilles uniforme diminue d'autant plus vite que le LAI de la plante est élevé (Schottman et Walter, 1982). Bien que le couvert des plantes puisse offrir une bonne protection du sol par rapport à la pluie incidente, certains sites particuliers, sous une canopée et à son extrémité, reçoivent de l'eau en quantité et en intensité largement supérieure à celles de la pluie incidente. Ces pics de concentration d'eau très localisés peuvent former des « flaques » d'eau, points de départ de ruissellement, lorsque l'alimentation dépasse la capacité d'infiltration du sol.

1.5.2. Evolution de l'infiltrabilité en relation avec l'état de surface

D'après les premiers résultats de l'expérience réalisée sur la parcelle concernant les volumes drainés à différentes positions par rapport au bananier (Sansoulet et al., 2004), le volume d'eau drainée est maximal, non pas au pied du bananier, mais en aval : le flux d'eau issu du stemflow n'alimente pas majoritairement le lysimètre situé sous le bananier. Deux hypothèses peuvent être formulées à partir de cette observation :

- 1- **Une redirection en surface** : l'écoulement le long du faux-tronc induit un lissage du sol au pied du bananier, une diminution de la capacité d'infiltration au cours du temps, et donc une grosse partie du flux d'eau issue du stemflow ruisselle et s'infiltré plus en aval.
- 2- **Un drainage latéral** : l'eau s'infiltré au pied du bananier puis subit un drainage latéral dans le sens de la pente vers le lysimètre plus en aval.

1.6. Objectifs de l'expérience

L'objectif du stage est d'acquérir les données expérimentales qui permettront d'étayer les hypothèses de fonctionnement hydrologique d'un bananier et de renseigner un modèle mécaniste 3D couplant infiltration et ruissellement qui permettra de tester les hypothèses de fonctionnement.

Dans le cadre du stage, la mise en œuvre du protocole expérimental doit permettre de :

- caractériser les flux hydriques à l'échelle locale d'un bananier.
 - Les flux entrants : stemflow, pluie incidente
 - Les flux sortants : drainage, ruissellement
 - Un suivi des stocks hydriques (mesures de potentiels matriciels)
- caractériser la surface du sol à l'échelle d'un bananier
 - Capacités d'infiltration, paramètres hydrodynamiques
 - Micro topographie
 - Variation de l'état de surface du sol

Les résultats attendus sont :

- la visualisation et la description des processus hydriques mis en œuvre lors de quelques événements pluvieux.
- La mise en relation de l'état de surface, des propriétés hydrodynamiques du sol et des flux hydriques.

2. Matériels et méthodes

2.1. La parcelle expérimentale

2.1.1. La parcelle

La parcelle « Espérance-haut » se situe dans la station du Cirad. Elle représente une culture bananière de deuxième année (premier rejeton) sur andosol de type volcanique. La parcelle a subi un travail sur toute l'épaisseur de l'horizon A (environ 30 cm) à la rotobèche en mars 2003, les bananiers ont été plantés en avril 2003 et la première récolte a eu lieu en janvier, février 2004. La parcelle est située sur un terrain présentant une pente moyenne de 12%. Les bananiers sont plantés suivant un motif carré de 2,35 m de coté.

Dans le cadre de l'expérience de redistribution de la pluie incidente, la mise en culture du bananier de la placette expérimentale a été réalisée en mars 2004 à partir d'un rejet issu d'une autre plantation. Durant le déroulement de l'expérience (juillet et août 2004), le stade de développement foliaire du bananier correspond à un LAI de 2 à 3.

2.1.2. Le sol

La parcelle Espérance-Haut présente deux horizons différenciables (cf. figure 1) :

- Horizon A (0 à 30 cm) : aspect grumeleux et friable, très poreux, de couleur foncée.
- Horizon B (30 à 90 cm) : aspect plus argileux, teneur en eau importante, de couleur plus orangée.



Source : Malaval, 2002

Figure 1 : Différenciation des horizons A et B dans un profil d'andosol - Parcelle " Espérance Haut "

Après le travail à la rotobêche en mars 2003, la conductivité hydraulique à saturation a été mesurée > 1000 mm/h. Une campagne de prélèvement effectuée au début de l'année 2004 a donné les résultats suivants :

Horizon A (10 – 17 cm): $K_{\text{sat}} = 44$ mm/h

Horizon B (50 – 57 cm): $K_{\text{sat}} = 728$ mm/h

Ces données ont été obtenues à partir de deux échantillons au laboratoire CSE d'Avignon par la méthode du perméamètre à charge constante.

A 90 – 100 cm, le socle volcanique forme une limite à l'infiltration.

Etats de surface :

Quatre états de surface ont été identifiés dans la bananeraie :

- **Etat de surface 1** « Zone d'accumulation » : c'est une zone où s'accumule les matériaux transportés par la lame d'eau ruisselée (amont du faux-tronc, obstacles au ruissellement).
- **Etat de surface 2** « Chemin d'eau »: en inter-rang, cette zone est creusée par le ruissellement.
- **Etat de surface 3** « Croûte + mousse »: c'est une zone peu sollicitée par les flux d'eau à la surface du sol, où une croûte de type végétale se développe.
- **Etat de surface 4** « Pied du bananier » : c'est la zone aval du faux-tronc, où l'andosol est remanié régulièrement par le stemflow (départ de matériaux). Il présente un aspect grumeleux, sans croûte, ni mousse.

2.1.3. Présentation du dispositif expérimental

L'ensemble du dispositif expérimental est présenté sur la figure 2. Il est composé d'un pluviomètre à augets, de 25 tensiomètres automatiques répartis sur la placette pour un suivi des potentiels hydriques, de 4 lysimètres permettant d'intercepter l'eau drainée, d'un bac recueillant l'eau ruisselée, et d'une mesure du stemflow.

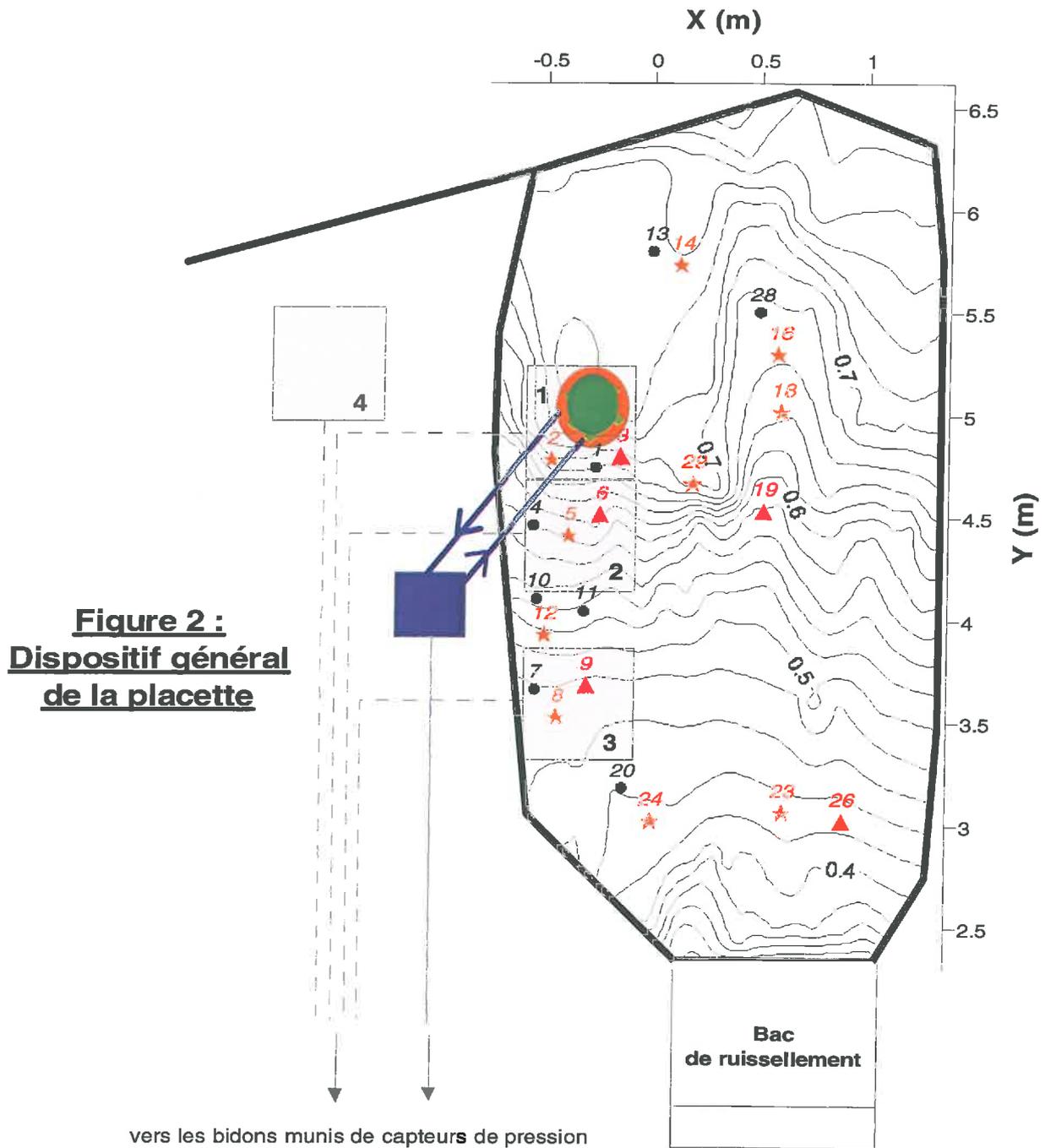


Figure 2 :
Dispositif général
de la placette

- | | | | |
|---|------------------------------------|--|-----------------------|
|  | Faux-tronc du bananier |  | Collerette |
|  | Tensiomètres de surface |  | Tuyaux |
|  | Tensiomètres à 25 cm de profondeur |  | Tôles |
|  | Tensiomètres à 55 cm de profondeur |  | Lysimètres |
| | |  | Partiteur de stemflow |

2.2. Les mesures

2.2.1. Micro topographie

La micro topographie initiale de la placette a été effectuée à l'aide d'un théodolite TRIMBLE 3300DR (ZSP Geodetic Systems GmbH, Carl-Zeiss Promenade 10, D-07745 JENA). Les points de mesure ont été relevés suivant des transects perpendiculaires à l'axe de la pente, puis le long de la tôle délimitant la placette et enfin autour du bananier.

Les coordonnées des points relevés sur la placette ont été traitées à l'aide du logiciel de géostatistique SURFER. La méthode d'interpolation utilisée est « Natural Neighbor » utilisant les polygones de Thiessen, avec une anisotropie de 2 dans le sens de la pente (angle de 90°), puisque la prise de coordonnées a été prise selon des transects perpendiculaires à l'axe de la pente.. Il est donc nécessaire pour l'interpolation de réattribuer du « poids » à la distance entre deux transects (figure 3 : schéma simplifié de la prise de coordonnées).

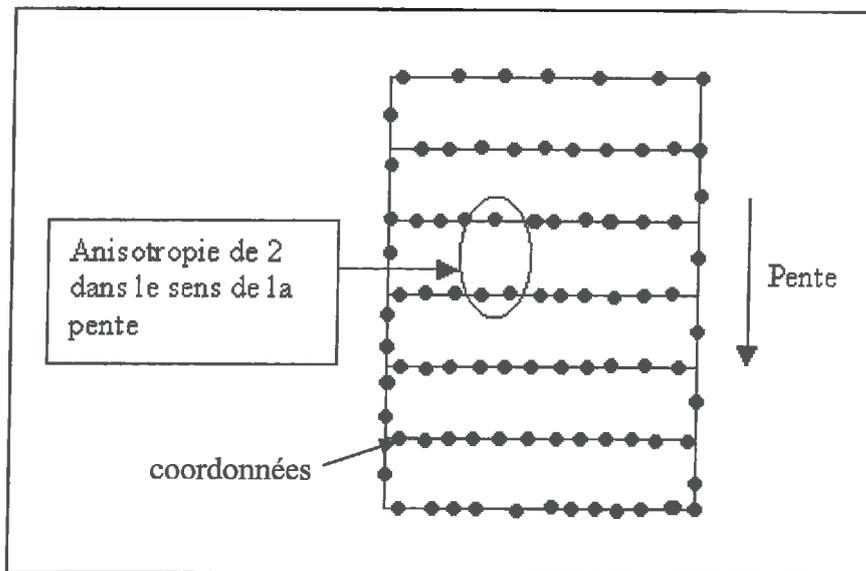


Figure 3 : schéma de la prise de coordonnées sur la placette

Les cartes réalisées grâce à Surfer vont permettre de :

- présenter la micro topographie de la surface de la placette,
- d'obtenir une visualisation des résultats (potentiels matriciels, conductivités hydrauliques),
- de mettre en relation l'état de surface, les propriétés hydrodynamiques et les flux hydriques,
- de connaître la surface de la placette.

2.2.2. Mesures des flux entrants

2.2.2.1. La pluviométrie

Le dispositif permettant de mesurer le flux d'eau précipité est composé d'un **pluviomètre à augets basculeurs** et d'un **mât** de 5 m de haut muni à son extrémité haute d'un entonnoir (diamètre : 24 cm ; surface d'interception : 452 cm²). Le mât permet la collecte de la pluie au-dessus de la canopée. L'entonnoir est connecté au pluviomètre à augets basculeurs par un tuyau. Ce pluviomètre collecte les données pluviométriques toutes les dix secondes, un basculement d'augets correspondant à une lame précipitée de 0,18 mm (il faut tenir compte du ratio des surfaces d'interception entonnoir/pluviomètre) :

$$\text{Lame précipitée (mm)} = (\text{surface entonnoir/surface pluvio}) * 0,2 \text{ (mm)}$$

0,2 mm correspondant à la lame précipitée lors d'un basculement d'augets pour un pluviomètre démuné d'entonnoir.

La comparaison entre les données du pluviomètre de l'expérience, et de celui situé en bas de la parcelle expérimentale (sur la parcelle Grande espérance bas, à 1 m de hauteur, collecte des données à la minute) indique que le pluviomètre en hauteur intercepte moins d'eau de pluie (cf. tableau 1), ce qui justifie *a posteriori* la mise en place d'un dispositif de mesure au dessus de la canopée et au centre de parcelle pour éviter certains biais (effet de bord, effet du vent).

Dates des événements comparés	Pluviomètre de l'expérience	Pluviomètre Grande espérance bas
3 juillet 2004	5,8 mm	6,2 mm
11 juillet 2004	5,0 mm	6,4 mm
28 juillet 2004	12,2 mm	13,2 mm
27 août 2004	51,4 mm	51 mm

Tableau 1 : Tableau de comparaison des données pluviométriques entre les deux pluviomètres de la parcelle.

Le pluviomètre permet en outre de déclencher l'acquisition des mesures par la centrale.

2.2.2.2. Le stemflow

Ce phénomène est quantifié grâce à l'élaboration d'une collerette permettant de recueillir l'eau s'écoulant le long du faux-tronc. Il est nécessaire pour étudier les flux d'eau au sol que l'eau ainsi interceptée soit réinjectée au pied du bananier en générant une perturbation minimale des écoulements, tant sur le plan quantitatif que qualitatif. A cet effet, un partiteur est disposé de manière à ne récupérer qu'un certain pourcentage du volume d'eau constituant le stemflow (pourcentage déterminé lors des étalonnages), le reste du flux d'eau étant réinjecté sur le faux-tronc au moyen d'une deuxième collerette située plus bas. Un schéma de

ce dispositif est présenté sur la figure 4. Le flux du stemflow est mesuré par l'intermédiaire d'un bidon muni d'un capteur de pression (présenté sur la figure 5 du paragraphe suivant).

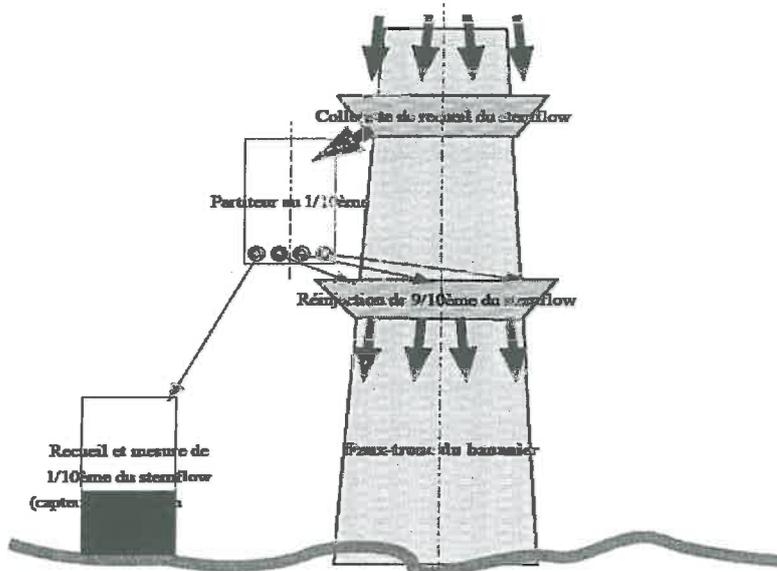


Figure 4 : Dispositif d'interception du stemflow

2.2.3. Mesures des flux sortants

2.2.3.1. Mesure des flux d'eau drainés

Les 4 lysimètres permettent d'évaluer la lame d'eau drainée à différents emplacements de la placette. Ils sont placés dans le sol à 60 cm de profondeur et répartis autour du bananier de la façon suivante (figure 2) :

1. A l'aplomb du bananier, le lysimètre 1 recueille une partie de l'eau infiltrée issue stemflow.
2. Adjacent au lysimètre 1, le lysimètre 2 appartient à la "zone parapluie" du bananier, il recueille la part de stemflow infiltré non interceptée par 1.
3. A mi-distance des deux bananiers dans le sens de la pente, le lysimètre 3 est hors « parapluie » en début de croissance du bananier, et reçoit les transferts de la pluie incidente, éventuellement enrichie par la redistribution du stemflow en aval. En fin de croissance, il peut prendre en compte l'effet redistributif « bout de feuille », puis l'effet « parapluie ».
4. Sur l'inter-rang, perpendiculairement à la pente, le lysimètre 4 est placé dans un « chemin d'eau ».

Les lysimètres utilisés sont équipés d'une mèche insérée dans un tuyau d'une quinzaine de mètres de long permettant de recueillir l'eau plus en aval. L'eau drainée est collectée dans des bidons munis de capteurs de pression (figure 5) permettant de connaître la hauteur d'eau dans ces derniers.

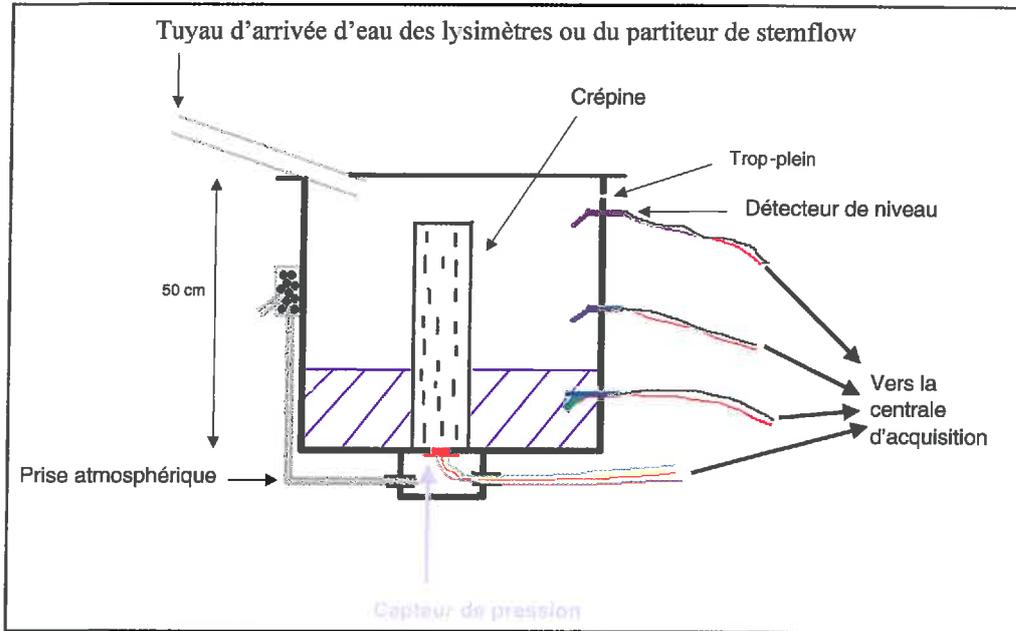


Figure 5 : Schéma d'un bidon muni d'un capteur de pression

2.2.3.2. Le ruissellement

Afin d'évaluer la lame d'eau ruisselée, la placette est délimitée par des tôles (cf. figure 2), contraignant l'eau issue de ruissellement à s'écouler vers un bac en aval. Celui-ci est muni d'un capteur de pression placé dans le fond du bac permettant d'obtenir des mesures instantanées de la lame d'eau ruisselée pendant l'événement pluvieux. La figure 6 présente le schéma du bac de ruissellement.

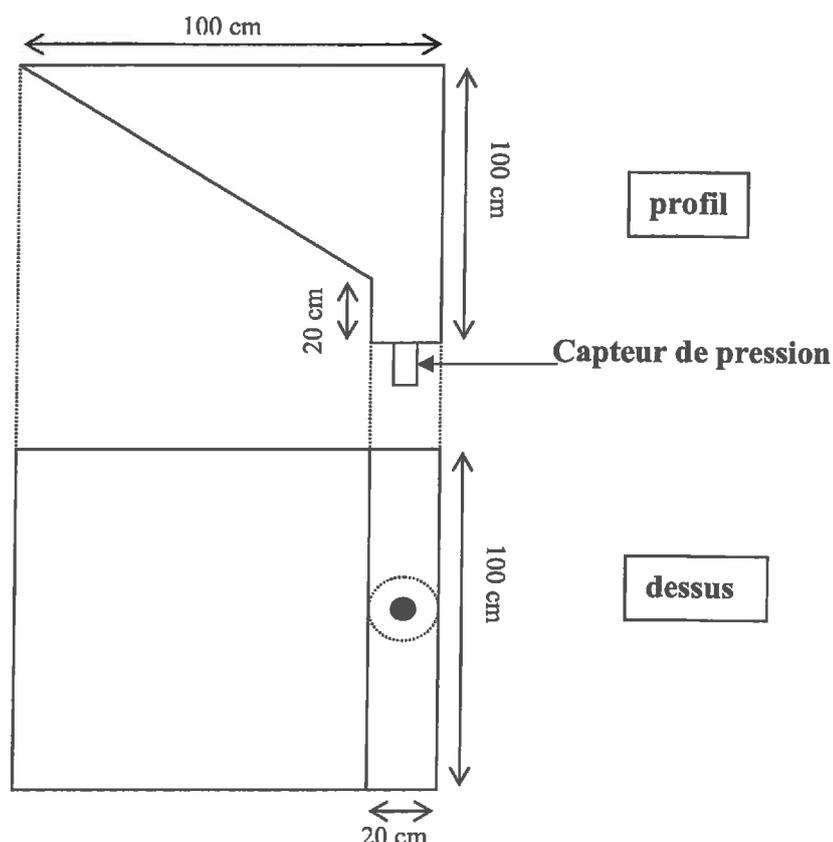
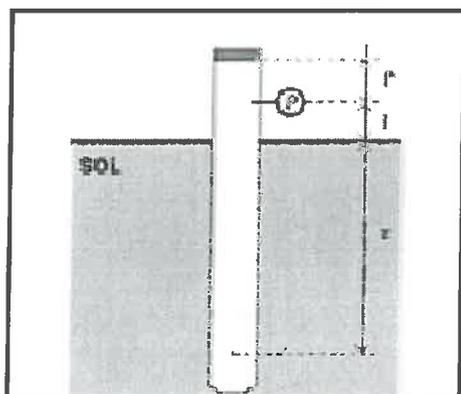


Figure 6 : Schéma du bac de ruissellement

2.2.4. Mesures des potentiels matriciels

Les tensiomètres permettent une mesure du potentiel hydrique, qui traduit l'état de liaison de l'eau dans le sol ou la quantité d'énergie qu'il faudrait fournir pour en extraire son eau. Le potentiel hydrique correspond à la somme de trois potentiels : le potentiel gravitationnel (fonction de la profondeur), le potentiel matriciel (forces capillaires et électrostatiques) et le potentiel osmotique, négligeable dans le cadre de l'expérience.



Si z est la profondeur du tensiomètre (m) et l la hauteur (m) entre la surface du sol et le trou où il y a la prise de pression, le **potentiel matriciel** Ψ_m (m d'eau) s'exprime de la façon suivante :

$$\Psi_m = P + l + z$$

où l et z sont positifs et P est négatif.

P (m) est mesuré grâce à un capteur de pression étalonné en pression et en température.

Pour l'étude des potentiels matriciels, 25 tensiomètres ont été utilisés. Leur répartition sur la placette a été déterminée suivant les emplacements des lysimètres et la micro-topographie initiale de la placette expérimentale (figure 2). Les tensiomètres ont été placés au-dessus de chaque lysimètre, en amont et en aval du bananier, le long de l'ancien chemin d'eau, sous la croûte ou sous les zones d'accumulation. Leurs coordonnées cartésiennes ont été relevées à l'aide d'un théodolite.

Les différentes profondeurs d'implantation permettent de mieux appréhender les variations spatiales du régime hydrique de la placette : 10 tensiomètres ont été placés à la surface (6 cm de profondeur), 10 tensiomètres à 25 cm de profondeur et 5 tensiomètres à 55 cm de profondeur.

Les cannes tensiométriques utilisées mesurent respectivement 10 cm, 30 cm, 60 cm, cette longueur correspondant à la distance entre le capteur tensiométrique et le milieu de la bougie poreuse.

2.3. Fonctionnement du dispositif expérimental

2.3.1. Description générale

Le dispositif est entièrement automatisé : des capteurs tensiométriques de type SDEC SKT850T sont placés sur les cannes tensiométriques, les hauteurs d'eau ruisselées et drainées, ainsi que le stemflow sont mesurés par des capteurs de pression (ICSensors Modèle 84) placés au fond des bidons récoltant les volumes d'eau. Des détecteurs de niveau à l'intérieur des bidons permettent de vérifier les hauteurs indiquées par les capteurs de pression. Les données sont enregistrées par une centrale d'acquisition Campbell de type CR10X.

2.3.2. Composition du dispositif électronique

- **Tensiométrie** : 25 capteurs tensiométriques SDEC SKT850T, 2 thermocouples (mesures relatives de température par rapport à une température de référence) placés sur la placette, permettant de filtrer la dérive thermique des tensions fournies par les capteurs.
- **Lysimétrie** : 4 capteurs de pression ICSensors Modèle 84, placés au fond des 4 bidons recueillant l'eau issue des lysimètres, 4 PT100 (mesure absolue de températures) fixés sur les capteurs de pression afin de filtrer la dérive thermique des tensions fournies par les capteurs de pression, 12 détecteurs de niveau (3 par bidons).

- Stemflow : **1 capteur de pression** ICSensors Modèle 84, **1 PT100** fixée au capteur, **3 détecteurs de niveau**, l'ensemble placé dans un bidon du même type que ceux utilisés pour la lysimétrie.
- Température de référence : Thermomètre de référence (Campbell scientific),
- Acquisition des données : une centrale d'acquisition Campbell type CR10X (Campbell scientific Ltd, Loughborough, Leicestershire, UK), deux multiplexeurs, 4 cartes électroniques.
- Alimentation : un panneau solaire et une batterie alimentant en 12V le dispositif.

Remarque : dans le cas des tensiomètres (étalonnés en dépression), la température de référence pour filtrer la dérive thermique est un thermocouple et il est commun à l'ensemble des capteurs. Pour les capteurs de pression (étalonnés en pression), c'est une PT100 et elle est individuelle (propre à chaque capteur).

2.3.3. Fonctionnement du dispositif électronique

La centrale d'acquisition et l'ensemble du dispositif électronique sont alimentés en 12V par une batterie connectée à un panneau solaire.

La centrale recueille les données par l'intermédiaire d'entrées analogiques. En mesures différentielles (cas du dispositif), 6 voies d'entrées sont disponibles. Or le dispositif expérimental nécessite 58 entrées analogiques (25 capteurs tensiométriques, 6 capteurs de pression, 18 détecteurs de niveau, 6 PT100, 3 mesures de température) selon les cas en mesures différentielles ou en mesures unipolaires. L'utilisation d'un multiplexeur permet d'augmenter le nombre d'acquisition : la centrale va effectuer des scrutations des voies d'entrées du multiplexeur et les enregistrer à partir d'une seule des ses entrées analogiques.

Pour l'expérience, nous disposons de 2 multiplexeurs :

Multiplexeur 1 (4M16) : il permet à la centrale d'acquisition d'effectuer 2 scrutations simultanées sur 2*16 voies, soit 32 entrées analogiques.

Multiplexeur 2 : il permet d'effectuer la scrutation voie par voie des 32 entrées analogiques.

Il est donc possible d'obtenir 64 mesures par scrutation de la centrale d'acquisition Campbell CR10X.

Cartes électroniques :

Chaque carte est composée de 10 plots de branchements pour les capteurs, d'une alimentation générale 12V, d'un relais commandé par la centrale d'acquisition, d'un convertisseur de tension 12V en tension 5V (cf. annexe ? : schéma d'une carte). L'intérêt de ces cartes est d'économiser la batterie d'alimentation grâce aux relais qui ne laissent passer le courant que lorsque la centrale d'acquisition envoie une impulsion, déclenchant alors les mesures des capteurs. Les trois premières cartes sont reliées au multiplexeur 1, la quatrième est reliée au multiplexeur 2.

2.3.4. Pas de temps d'acquisition des données :

Le pluviomètre à augets basculeurs permet de démarrer l'acquisition des données et de connaître la hauteur des précipitations. Le basculement d'un auget enclenche un processus temporel d'acquisition des données :

- 1 scrutation toutes les 10 secondes pendant 10 minutes après le dernier basculement
- puis 1 scrutation toutes les 30 secondes pendant 1 heure
- puis 1 scrutation toutes les 5 minutes pendant 6 heures

En l'absence de précipitation : une mesure toutes les quinze minutes.

2.4. Caractérisation de la variabilité spatiale de l'infiltration

2.4.1. Objectifs et méthodes employées

Une campagne de mesures est effectuée pendant la durée de l'expérience pour déterminer les valeurs de conductivité hydraulique à saturation à différents emplacements de la placette en subsurface (horizon A), et à 30cm de profondeur (horizon B). Préalablement au stage, au mois de février, une campagne préliminaire avec la méthode Wind a permis d'obtenir des premières valeurs de Ksat, mais cette méthode nécessite des prélèvements, elle n'est donc pas renouvelable sur la placette car elle modifierait l'état de surface. L'infiltrométrie DECAGON (Soils Physics Instruments Decagon Devices, Inc. 950 NE Nelson Court Pullman, Washington 99163) est une méthode non destructrice et ponctuelle qui peut être utilisée pour caractériser spatialement la placette, mais il faut préalablement la comparer *in situ* avec une méthode « de référence », l'infiltrométrie à charge nulle de type Beer-Kan (Haverkamp et al. 1998, De Condappa 2000), pour passer d'une description qualitative des courbes d'infiltration à des paramètres quantifiés (Ks,...).

La variation spatiale des valeurs de conductivité hydraulique à saturation permettra d'établir une correspondance entre la capacité du sol à l'infiltration et les flux d'eau drainés et ruisselés à l'échelle de la placette.

2.4.2. Infiltromètre à charge nulle de type « Beer-Kan »

2.4.2.1. Description

La méthode Beer-kan repose sur les théories de l'analyse dimensionnelle appliquée à l'infiltration (Birkhoff 1960). L'hypothèse sous-jacente est que toute courbe d'infiltration, $I(t)$, peut être ramenée à une courbe adimensionnelle universelle d'infiltration, $I^*(t^*)$, par l'application de deux facteurs d'adimensionnalisation (Haverkamp et al. 1998) :

$$\alpha_l = I^*/I \text{ et } \alpha_t = t^*/t$$

avec α_l en mm^{-1} et α_t en s^{-1} .

Ces deux facteurs intègrent la totalité des spécificités de l'essai d'infiltration (type de sol, conditions initiales et à la limite) et permettent notamment de calculer la conductivité hydraulique à saturation qui s'écrit :

$$K_s = \alpha_t / \alpha_l$$

à condition que K_0 , conductivité à l'humidité initiale de l'essai d'infiltration, soit largement inférieure à K_s . Cette condition, assez facilement vérifiée dès que le sol est en régime non saturé, peut être testée en considérant que la conductivité hydraulique suit la loi de Brooks and Corey :

$$K(\theta) = (\theta / \theta_{\text{sat}})^\eta$$

Une mesure de densité apparente permet d'estimer la porosité du sol et donc θ_{sat} .

Formule de la densité apparente :

$$DA = \frac{\text{Masse volumique apparente du sol}}{\text{Masse volumique de l'eau}} = \frac{m_{\text{sol}}}{V_{\text{sol}}} \times \frac{1}{1000} \text{ [sans unité]}$$

avec

$$\text{Masse volumique apparente du sol} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{m_{\text{sol}}}{V_{\text{sol}}}$$

$$\text{Masse volumique de l'eau} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{m_{\text{eau}}}{V_{\text{eau}}} = 1000$$

Une mesure texturale (minimum 5 fractions) permet grâce aux relations de pédotransferts à base physique (Zammit et al. 1999) de déterminer η . Enfin, la mesure de l'humidité initiale θ_0 permet de calculer $K_0 = (\theta_0 / \theta_{\text{sat}})^\eta$.

2.4.2.2. Mise en œuvre de la méthode dite « Beer-Kan » (Ruy, 2001)

Le protocole est décrit dans Findeling (2001, section 4.1.2.2). Les variables à mesurer sont :

- La courbe granulométrique 8 fractions (<2 mm),
- La densité apparente sèche du sol,
- La teneur en eau initiale au voisinage géographique du domaine d'infiltration,
- L'infiltration cumulée dans le temps sous charge contrôlée,

L'infiltration cumulée est mesurée à l'aide d'un cylindre d'un diamètre d'environ 15 cm enfoncé précautionneusement dans le sol (pour éviter les effets de bord). Un volume d'eau fixé de manière à obtenir une charge hydraulique d'1 cm de hauteur est versé dans le cylindre. Lors du versement, l'état de surface du sol est protégé à l'aide d'un film plastique que l'on retire ensuite. L'heure de mise en charge est notée. Dès que la lame d'eau a disparu, on verse un volume d'eau identique et on note l'heure de disparition. Cette opération doit être répétée au moins 4 fois.

La charge hydraulique est considérée constante (elle varie entre 1 et 0 cm).

La densité apparente sèche est mesurée à l'aide d'un cylindre de 100 cm³ dans la couche 0-5 cm.

Un profil de teneur en eau gravimétrique est réalisé à proximité du cylindre d'infiltration, à l'aide d'une tarière, tous les 10 centimètres sur une profondeur de 60 cm.

La détermination de η n'a pas été réalisée directement avec **la courbe granulométrique**, mais par une relation entre les paramètres m et n (paramètres déterminés précédemment par P. Cattani) :

$$\eta = 3 + 2 / (m * n) \text{ (Haverkamp et al. 1998)}$$

2.4.2.3. Traitement des données Beer-Kan (traitements réalisés par A. Findeling, CIRAD Montpellier)

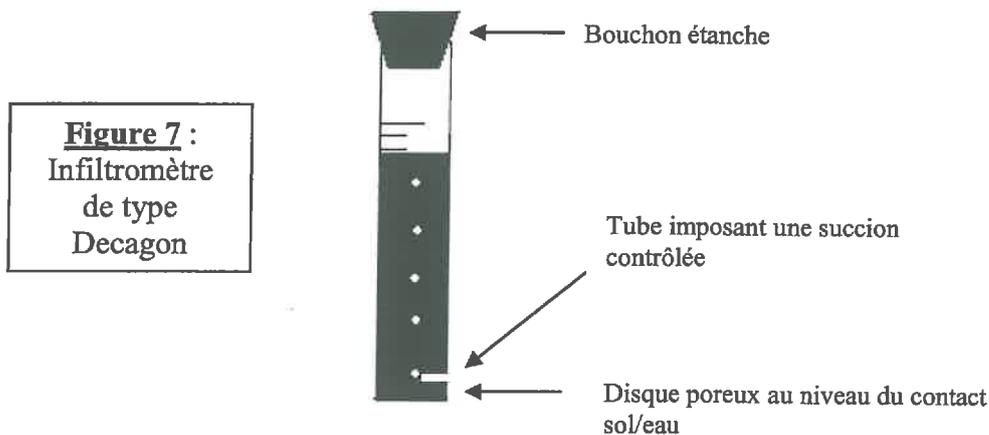
Le traitement des données d'infiltration a été fait par ajustement des paramètres α_1 et α_2 pour chaque essai d'infiltration à l'aide du solveur d'excel.

Le test $K_0 \ll K_{sat}$ a été vérifié dans (presque) tous les cas.

2.4.3. Infiltromètre à succion de type Decagon

2.4.3.1. Description

Les infiltromètre Decagon fonctionnent sur le principe des infiltromètres à disques, qui consiste à mesurer le flux d'infiltration axisymétrique de l'eau dans le sol à travers un disque poreux. Le potentiel de l'eau à l'interface disque/sol, négatif et constant au cours du temps, est fixé par l'utilisateur. Dans le cas des Decagons, le potentiel de l'eau est déterminé par le diamètre d'un tube de mise à la pression atmosphérique situé à la base de l'infiltromètre (figure 7). Dans le cadre de notre étude, la succion a des valeurs de 6 cm, 2 cm et 0,5 cm.



2.4.3.2. Mise en œuvre de la mesure d'infiltration Decagon

L'infiltromètre est plongé dans l'eau afin de le remplir. Le bouchon est enfoncé soigneusement de manière à ce que l'eau ne sorte plus par le disque poreux. La zone de contact sol/infiltromètre doit être suffisamment plane pour que le contact soit parfait (une couche de sable fin ou de terre fine peut être ajoutée afin d'aplanir la zone de contact). On note le niveau et l'heure de début d'infiltration, puis le niveau de l'eau dans l'infiltromètre est relevé à intervalle fixe jusqu'à obtention d'un régime permanent. On remplace alors l'infiltromètre par un autre de succion plus faible, et on répète l'opération. Le suivi de l'infiltration doit être réalisé pour au moins trois succions si l'on souhaite utiliser la méthode multipotentiel pour le traitement des données.

2.4.3.3. Traitement

Théorie de l'infiltration axisymétrique et de la méthode multipotentiel (Coquet et al., 2000) :

La solution approchée de Wooding (1968) au calcul de flux en régime permanent à partir d'un disque de rayon r s'écrit

$$q_{\infty}(h_0) = K(h_0) + \frac{4\Phi(h_0)}{\pi r}$$

avec $q_{\infty}(h_0)$ [$L.T^{-1}$] : densité de flux d'infiltration en régime permanent à la surface du sol
 $K(h_0)$ [$L.T^{-1}$] : conductivité hydraulique du sol au potentiel d'infiltration h_0
 $\Phi(h_0)$ [$L^2.T^{-1}$] : potentiel d'écoulement (Gardner, 1958).

Conditions d'application :

- 1- Le sol est considéré comme un milieu semi-fini (limité uniquement par sa surface), homogène et isotrope. Pour le cas particulier des croûtes, on fait l'hypothèse que la zone croûtée est limitante pour l'infiltration et l'on considère en première approximation que tout se passe comme si l'on avait une épaisseur de croûte infinie.
- 2- Le potentiel initial h_i de l'eau dans le sol est constant dans tout le sol et tel que $K(h_i) \ll K(h_0)$
- 3- La relation $K(h)$ est de type exponentiel (Gardner, 1958) :

$$K(h) = K_S \exp(\alpha h)$$

Avec K_S [$L.T^{-1}$] : conductivité hydraulique à saturation et α [L^{-1}] : constante caractéristique du sol

L'équation de Wooding se linéarise en simplifiant l'expression du potentiel d'écoulement et peut s'écrire :

$$q_{\infty}(h_0) = K_S \exp(\alpha h_0) \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right]$$

D'après cette dernière relation, pour un potentiel d'infiltration (suction) et un rayon de disque r donnés, le flux d'infiltration ne dépend que de deux paramètres : la conductivité hydraulique à saturation K_S et le paramètre α . Sous sa forme logarithmique, la relation s'écrit :

$$\ln(q_{\infty}(h_0)) = \ln \left[K_S \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] \right] + \alpha h_0$$

- **Méthode par régression linéaire** : deux mesures de $q_{\infty}(h_0)$ suffisent pour obtenir la pente α et déduire K_S de l'ordonnée à l'origine. Cependant, la linéarité de l'équation est rarement vérifiée : α n'est pas constant mais dépend de h_0 . Si l'on dispose de plus de deux mesures, on peut effectuer une régression linéaire sur les points de coordonnées [$\ln q_{\infty}(h_0)$, h_0]

- **Méthode multipotentiel (Ankeny et al., 1991)** : Trois mesures de $q_{\infty}(h_0)$ permettent de s'affranchir du problème ; on considère α ($=\alpha_{jk}$) constant sur un intervalle $[h_j; h_k]$. Pour trois succions (h_j, h_k, h_l), on obtient deux α (α_{jk} et α_{kl}) et deux K_S (K_{jk} et K_{kl}) (figure 8). Ankeny et al. (1991) proposent de calculer une conductivité $K(h_k)$ moyenne arithmétique des estimations à gauche ($K_g(h_k)=K_{jk}\exp(\alpha_{jk}h_k)$) et à droite ($K_d(h_k)=K_{kl}\exp(\alpha_{kl}h_k)$).

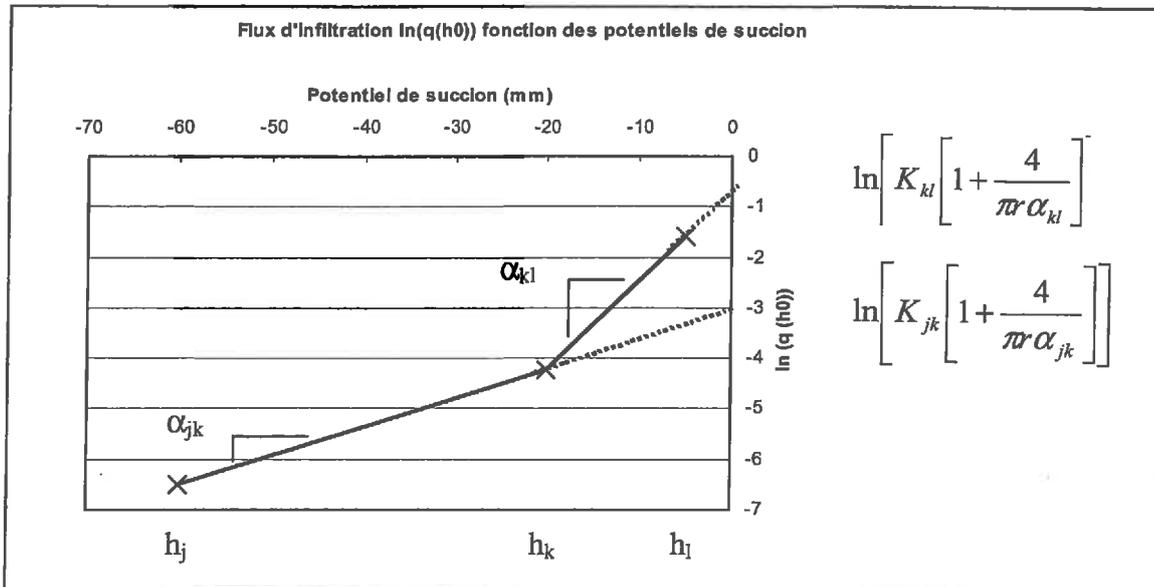


Figure 8 : calcul des paramètres K_{jk} , K_{kl} et α_{jk} , α_{kl} pour l'estimation de $K(h_k)$

2.4.4. Plan d'expérience

2.4.4.1. Comparaison des méthodes

La méthode Beer-Kan servant de référence pour valider la méthode Decagon, une série de mesures hors placette est mise en place afin d'obtenir une relation permettant de transformer les valeurs de conductivité hydraulique mesurées sur la placette par les infiltromètres à disque Decagon en équivalence Beer-Kan. Pour chaque état de surface, deux séries de mesure sont effectuées de la manière suivante :

1. un cylindre Beer-Kan est placé au centre du dispositif,
2. trois infiltromètres Decagon sont placés autour,
3. on prélève à la tarière le sol sur 60 cm pour réaliser un profil d'humidité,
4. on prélève 100 cm^3 de sol pour déterminer la densité apparente,
5. on réalise les séries d'infiltrométrie Beer-Kan et Decagon.

Les valeurs obtenues par l'infiltrométrie Decagon hors placette sont traitées par régression linéaire des points de coordonnées ($h_0, \ln q(h_0)$). Cette méthode, plus simple que la méthode multipotential, donne des valeurs de K_{sat} élevées, mais la relation Beer-Kan / Decagon que recherchée permettra de corriger les valeurs.

2.4.4.2. Localisation des mesures Decagons sur la placette

Sur la placette, seuls les infiltromètres Decagon, non destructifs, sont utilisés. Six emplacements représentatifs ont été déterminés afin de mettre en évidence les variations de conductivité hydraulique à la surface du sol sous bananeraie (cf. figure 9) :

1. au pied du bananier, état de surface 4
2. légèrement en aval du bananier (au-dessus du lysimètre 2), état de surface 4
3. dans l'ancien chemin d'eau, état de surface 2
4. sur croûte, en amont de la placette, état de surface 3
5. sur croûte, à l'exutoire de la placette, état de surface 3
6. au centre de la placette, lieu d'égouttage des feuilles, état de surface 2.

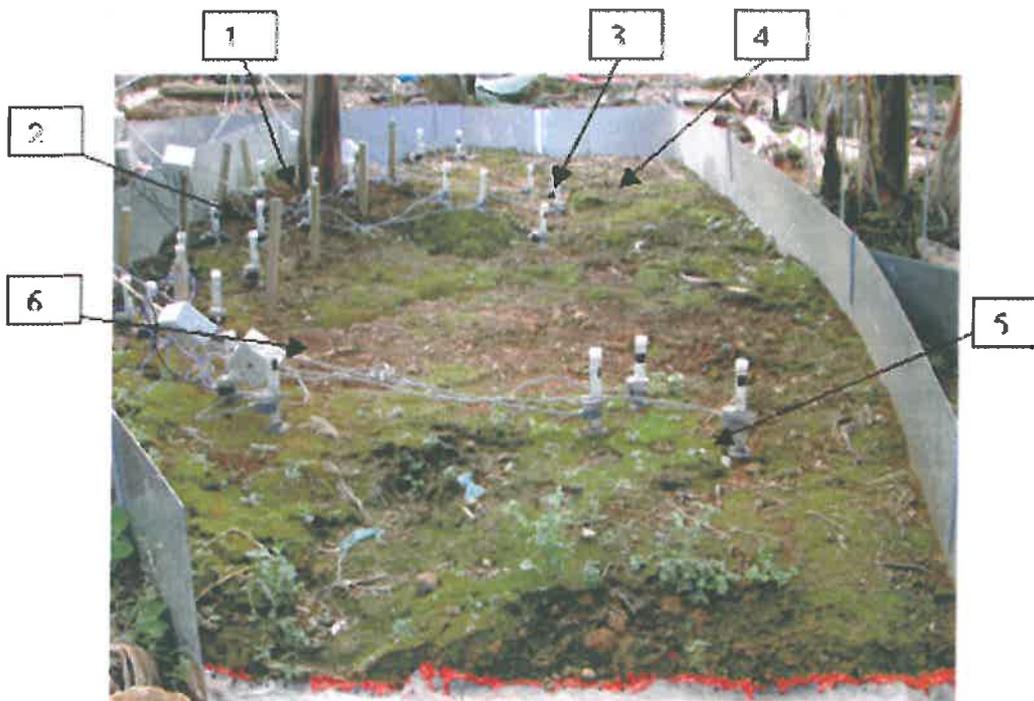


Figure 9 : Emplacements des mesures d'infiltrométrie

Sur chaque emplacement, trois séries de mesures Decagon sont effectuées.

L'état de surface 1 (en amont du bananier) n'est pas étudié car il n'apporte pas de renseignements utiles à la compréhension des processus hydrologiques de la placette.

2.5. Les étalonnages

2.5.1. Etalonnages des capteurs tensiométriques SDEC SKT850T et des capteurs de pression ICSensors Modèle 84

L'étalonnage des capteurs tensiométriques consiste à appliquer à une température donnée des dépressions progressives. A chaque température correspond une relation linéaire de la forme :

$$P = a \times U(mV) + b \quad (1)$$

Avec P : pression (suction) (m d'eau)

U : signal électrique émis par le capteur en réponse à la suction appliquée (mV)

En réalisant une régression multilinéaire, on obtient une unique relation de la forme :

$$P = a1 \times U + a2 \times U \times T + a3 \times T + b \quad (2)$$

Avec T : température (°C)

L'étalonnage a concerné au total 71 capteurs tensiométriques (dont 25 serviront dans le cadre de l'expérience, quelques-uns serviront à remplacer un capteur qui deviendrait défectueux et les autres seront utilisés pour d'autres expériences de l'INRA). L'étalonnage a été réalisé successivement à des températures de 20°C, 25°C et 33°C. Ces températures ont été choisies afin de couvrir la gamme de température sous bananeraie. Pour une température fixée fournie par un thermocouple, les capteurs ont été soumis à des dépressions progressives (0 m, -2 m, -4 m, -6 m et -7,5 m). Pour chaque dépression, la centrale d'acquisition Campbell a effectué 40 scrutations.

L'étalonnage des capteurs de pression est effectué selon le même principe, avec des pressions de 0 m, 0,1 m, 0,2 m, 0,5 m et 1 m, la hauteur d'eau maximale dans les bidons étant de 0,5 m et dans le bac de ruissellement de 1 m. Les températures d'étalonnage sont fournies par les PT100 préalablement fixées aux capteurs.

Les résultats (coefficients d'étalonnage, résidus) sont présentés en annexe 2 - Etalonnage des capteurs tensiométriques et de pression.

2.5.2. Etalonnages des bidons et du bac de ruissellement munis de capteurs

Principe des étalonnages

Pour mesurer un flux (ou une lame cumulée...) il faut 2 étalonnages successifs :

- un étalonnage qui permet de transformer la tension électrique délivrée par le capteur en pression exprimée en hauteur d'eau (décrit au § 2.5.1.),
- puis 1 étalonnage qui permet d'obtenir le volume d'eau dans le bidon à partir de la hauteur d'eau mesurée par le capteur de pression dans le bidon ou dans le bac de ruissellement. Ce volume sera ensuite traduit en lame d'eau infiltrée (volume/surface du lysimètre) ou en lame d'eau ruisselée (volume/surface de la placette).

Mise en œuvre :

L'étalonnage d'un bidon ou du bac de ruissellement muni d'un capteur de pression est réalisé en versant un volume connu dans le bidon conçu pour récolter les flux d'eau issus du stemflow ou des lysimètres. A chaque versement, la centrale d'acquisition enregistre une mesure de hauteur d'eau dans le récipient fournie par le capteur. Les relations « hauteur mesurée par le capteur fonction du volume versé » puis « lame d'eau drainée (ou infiltrée) fonction de la hauteur mesurée par le capteur » sont obtenues et utilisées pour l'interprétation des résultats. Ceux-ci sont présentés en annexe 3 (étalonnages des bidons et du bac de ruissellement munis de capteurs de pression).

2.5.3. Etalonnages du partiteur de stemflow

L'étalonnage du partiteur a tout d'abord été effectué en laboratoire, puis sur le terrain après son installation. Le principe est de verser un certain volume d'eau dans la collerette en faisant varier le débit (on verse l'eau plus ou moins rapidement), et de peser l'eau récoltée (en laboratoire) ou d'en mesurer le niveau (dans le bidon, sur le terrain) grâce au capteur de pression. Le but est de déterminer le pourcentage d'eau récoltée par le partiteur en fonction du débit d'eau versée. En laboratoire, F. Bussière a obtenu un pourcentage de 7% avec une légère diminution de cette valeur lorsque le débit augmentait. Sur le terrain, nous avons été confrontés au problème de résolution du capteur de pression. La hauteur mesurée augmentait par palier. Les calculs ont été réalisés en cumulant les volumes versés et il n'a donc pas été possible de noter une différence de répartition de l'eau versée en fonction des différents débits. Les résultats sont présentés en annexe 4. Le pourcentage d'eau récolté est de 6,5%.

2.6. Acquisition automatique et calendrier d'intervention

2.6.1. Acquisition et traitements des données

La centrale d'acquisition Campbell fournit des données de mesures sous la forme d'une base de données en format texte. Ces données sont récoltées de façon régulière sur le terrain à l'aide d'un ordinateur portable. Celles-ci sont ensuite traitées par l'intermédiaire du logiciel EXCEL (Microsoft Office). Afin de ne pas saturer les feuilles de calcul d'Excel, des requêtes Excel (utilisant Microsoft Query) ont été mises en place :

- une requête affichant uniquement les données permettant de calculer les potentiels matriciels (jour, heures/minutes, secondes, basculements d'augets, température de référence, températures des thermocouples, tensions délivrées par les tensiomètres),
- une requête affichant les données relatives aux niveaux de l'eau dans les bidons lysimétriques et de stemflow et dans le bac de ruissellement (jour, heures/minutes, secondes, basculements d'augets, tensions délivrées par les capteurs de niveau, positions des détecteurs de niveau).

Ces requêtes permettent d'afficher les données concernant une certaine durée choisie par l'utilisateur (exemple : du début des précipitations jusqu'à la fin du drainage).

2.6.2. Calendrier d'interventions

L'expérience a été menée en trois temps :

- une première campagne de mesure est réalisée sans interception du stemflow (du 25 juin au 27 juillet 2004),
- une seconde campagne, assez courte, intercepte intégralement le flux d'eau (du 30 juillet au 3 août 2004) ce qui permet d'étudier les flux ruisselés et drainés sans participation du stemflow,
- enfin une troisième campagne est réalisée pendant laquelle une fraction du stemflow est interceptée, le reste étant redistribué au pied du bananier (du 5 août au 28 août 2004).

Les dates de ces campagnes sont fournies dans le tableau de l'annexe 5. Ce tableau indique également les dates et heures de certaines interventions techniques qui ont nécessité un déclenchement manuel du pluviomètre à augets, afin d'obtenir des scrutations de l'ensemble des capteurs toutes les 10 secondes. Il est impératif de connaître les dates de ces interventions pour ne pas traiter les données pluviométriques de ces jours là.

3. Présentation des résultats et discussion

3.1. Conditions pluviométriques

D'après la station météorologique de la parcelle « Grande Espérance bas », les précipitations mensuelles de juillet et d'août (durée de l'expérience) ont été respectivement de 368 mm et 300 mm. La moyenne hebdomadaire précipitée sur cette période est de 70 mm, avec un minimum hebdomadaire de 14 mm dans la semaine du 15 au 22 août 2004. La semaine suivante, du 23 au 29 août 2004 enregistre la plus forte hauteur précipitée en une semaine, 113 mm, concernant toujours la pluviométrie enregistrée pendant la durée de l'expérience.

3.2. Caractérisation physique

3.2.1. Présentation de la micro topographie

Le traitement par Surfer des données obtenues par le relevé au théodolite réalisé début juin 2004 a permis d'établir une figure simplifiée en 3 dimensions de la placette (figure 10). Elle présente la micro topographie de la surface de la placette, ainsi que la position du bananier, des lysimètres et du bac de réception des eaux de ruissellement.

Observations :

- En inter-rang, le ruissellement a creusé le sol de la placette avant que les tôles soient mise en place pour la délimiter.
- Le bananier est placé sur un monticule de terre : le flux d'eau issu du stemflow creuse le sol en emportant des agrégats de terre, alors qu'en amont, une zone d'accumulation de sol se forme.
- En aval du bananier, on observe un léger sillon formé par l'eau qui ruisselle depuis le faux-tronc du bananier et rejoint l'inter-rang.

Surface de la placette : Le logiciel Surfer permet d'obtenir un calcul de la surface réelle de la placette, tenant compte des microreliefs du sol. La surface obtenue par interpolation est de 7.79 m². Cette valeur a été utilisée pour le calcul de la lame ruisselée.

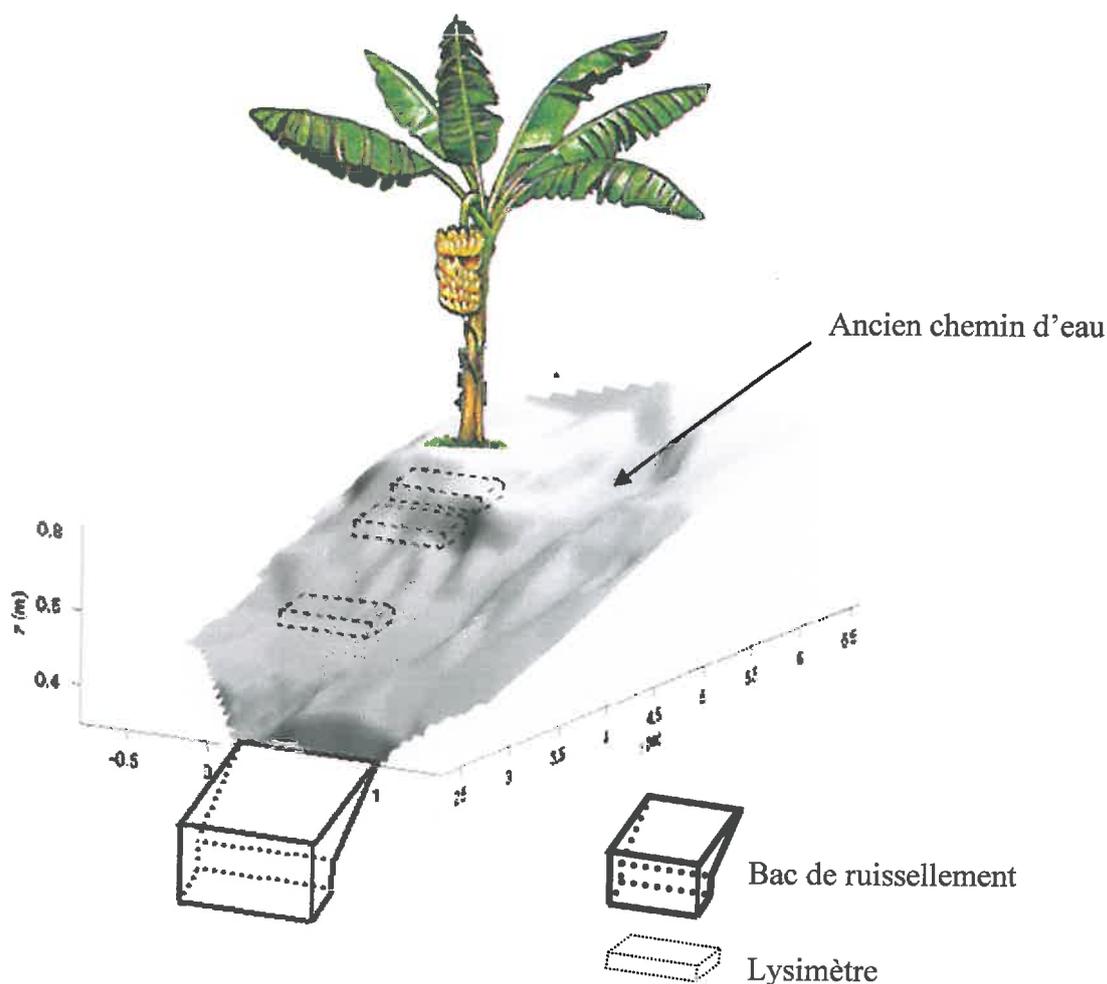


Figure 10 : Présentation de la micro topographie de la placette

3.2.2. Evolution des états de surface

Au cours de l'expérience, l'état du sol à la surface de la placette a subi des changements d'aspects. L'observation de l'état du sol peut permettre d'interpréter la répartition spatiale des flux d'eau sur la placette.

- Développement d'une croûte puis d'une mousse dans les zones peu sollicitées par les flux hydriques (amont du bananier, microreliefs...). La formation de cette croûte semble être d'origine biologique. Cet état de surface représente en fin d'expérimentation plus de 50% de la surface du sol de la placette.
- Au pied du bananier, dans l'ancien chemin d'eau et au niveau des impacts d'égouttage, la croûte et la mousse ne se développent pas. Les impacts d'égouttage arrachent localement une couche superficielle de sol et forment des cratères (figure 11) et les emplacements de ceux-ci évoluent au cours du développement du couvert végétal du bananier.

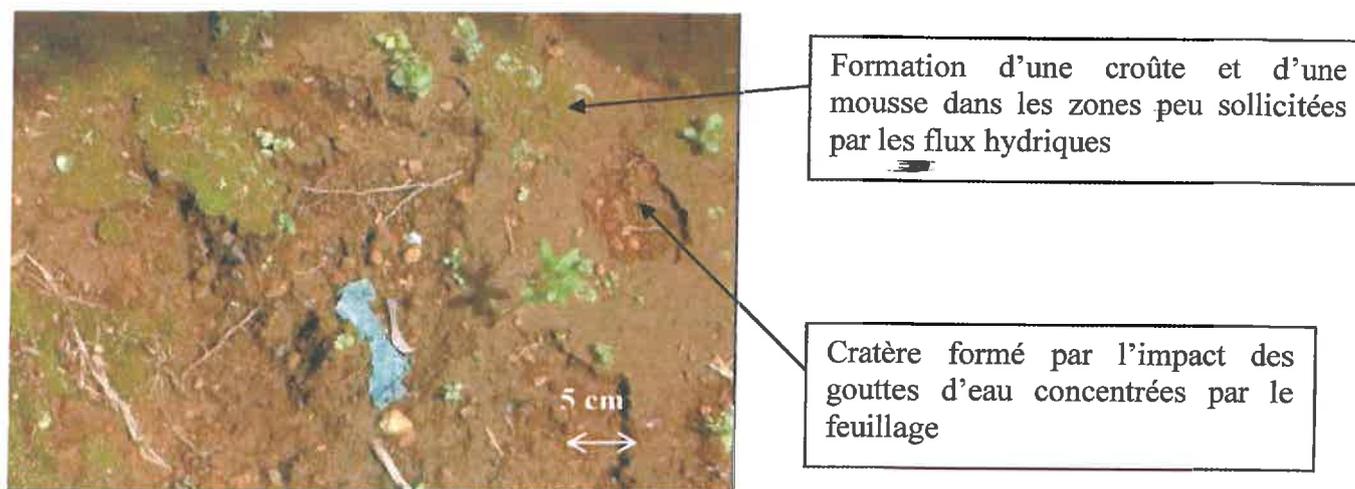


Figure 11 : Formation de cratères à la surface de la placette (29/07/04)

- Au pied du bananier et dans l'axe de la pente sur quelques dizaines de centimètres, le sol garde un aspect remanié, aéré et grumeleux (figure 12).

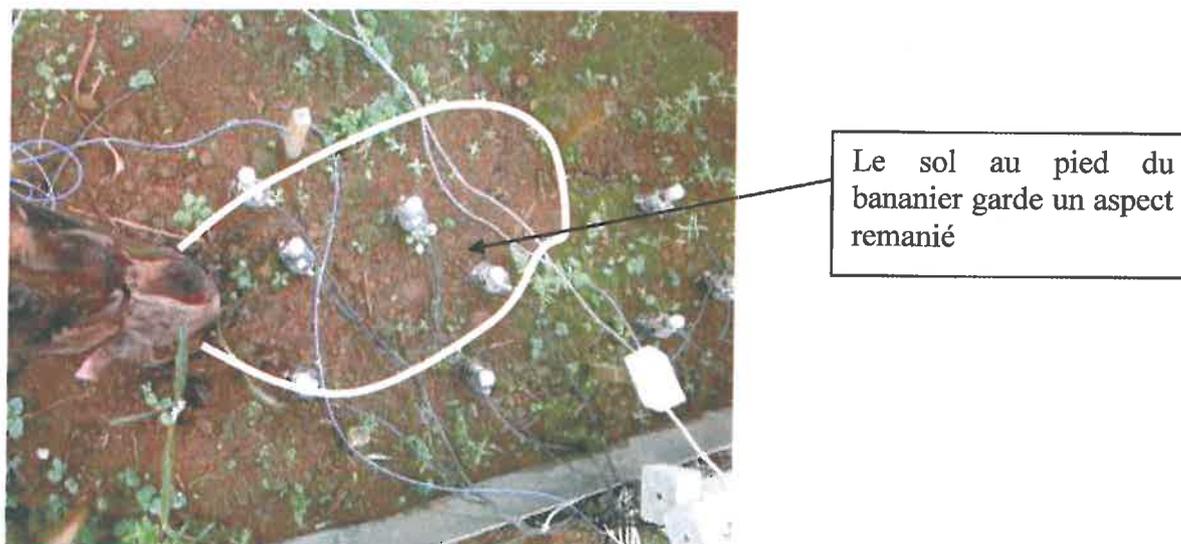


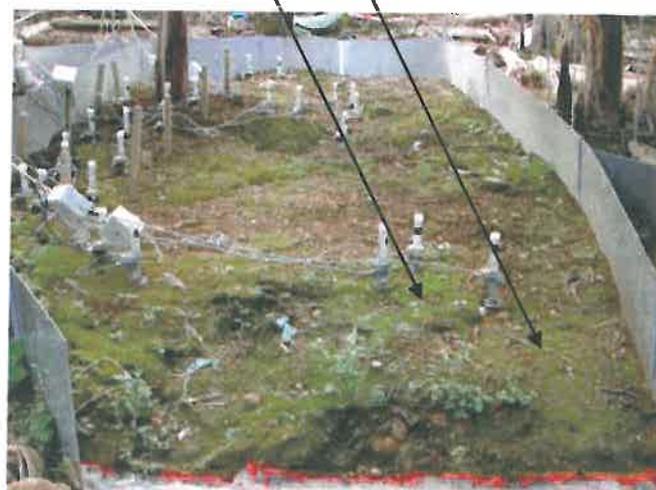
Figure 12 : Aspect remanié du sol au pied du bananier (29/07/04)

L'évolution générale de l'état du sol de la placette tend vers un développement de l'état de surface 3 (croûte + mousse) au cours de la croissance du bananier (figure 13). L'observation des zones où la croûte et la mousse ne se développent pas (pied de bananier, chemin d'eau, zone centrale de la placette) permet de déterminer visuellement les zones d'égouttage et les zones de ruissellement. L'étude de l'état du sol apparaît donc comme une méthode d'étude préalable des processus hydriques qui ont lieu à la surface de la placette (approche qualitative).

Développement d'une croûte et de mousse



Photographie prise de 4 juin 2004



Photographie prise de 19 juillet 2004

Figure 13 : Evolution de l'état de surface du sol de la placette

Observation d'un événement pluvieux :

L'observation sur le terrain d'un événement pluvieux a permis d'observer certains phénomènes confirmés par la suite par l'étude des potentiels matriciels de surface :

- La formation rapide de « flaques » (figure 14) dans les zones d'égouttage (dépassement de la capacité d'infiltration). A partir de cet état, il peut y avoir départ de ruissellement par gravité.
- Puis déclenchement du stemflow qui commence par s'infiltrer au pied du bananier. L'intensité de l'évènement pluvieux observé n'était pas suffisante pour observer un ruissellement démarrant du pied du bananier.



Formations de flaques d'eau en inter-rang

Figure 14 :
Photographie prise lors d'un événement pluvieux

3.2.3. Paramètres hydrodynamiques et structuraux

Les paramètres principaux sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	Densité Apparente	Porosité [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]	θ_{sat} [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]
Horizon A	0,76	0,71	0,67
Horizon B	0,606	0,77	0,73

Tableau 2 : Paramètres hydrodynamiques et structuraux mesurés sur andosol à proximité de la placette

Relation Beer-Kan/Decagon :

D'après les résultats obtenus hors placette lors de la comparaison Beer-Kan/DECAGON, on obtient la relation suivante (cf.figure 15) :

$$Ks_{\text{Beer-Kan}} = 19,198 \times Ks_{\text{Decagon}}^{1,441}$$

Une analyse de variance permet d'obtenir un intervalle de confiance concernant la constante 1,441 de $\pm 1,17$. Cet intervalle étant élevé, les valeurs Decagon obtenues sur la placette ne seront finalement pas transformés en Ks Beer-Kan, mais traités par la méthode multipotentielle. Les valeurs obtenues seront ensuite comparées pour déterminer les zones à capacité d'infiltration forte ou faible.

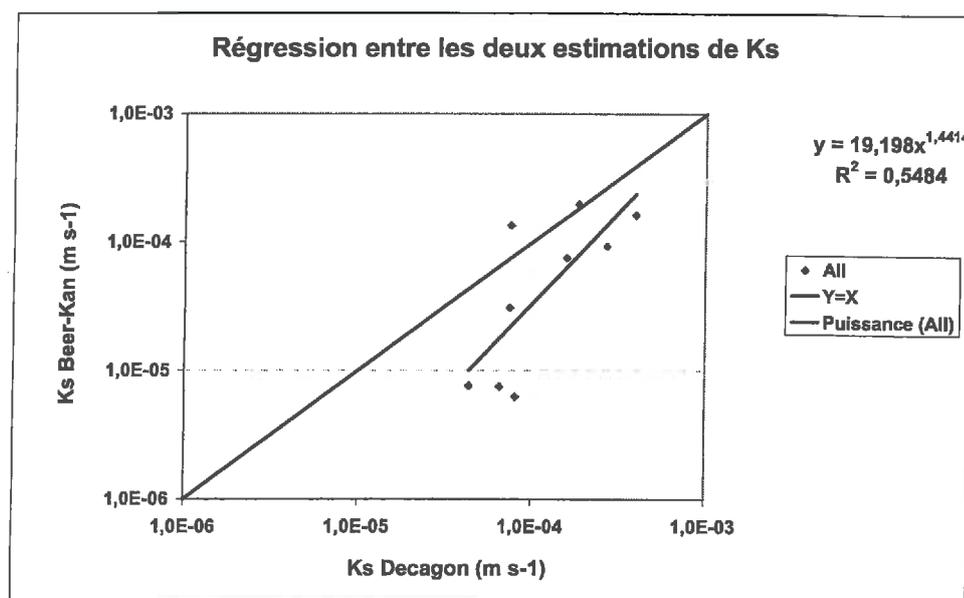


Figure 15 : relation Beer-Kan / Decagon

Résultats Beer-Kan hors de la placette :

L'étude des valeurs de conductivité hydraulique à saturation obtenues par la méthode Beer-Kan (les résultats sont présentés en annexe 6) ne permet pas de conclure à une différence de K_s entre les différents états de surface, mis à part pour l'état de surface 3. La figure 16 présente ces valeurs sur une échelle logarithmique qui permet d'observer cette différenciation de conductivité.

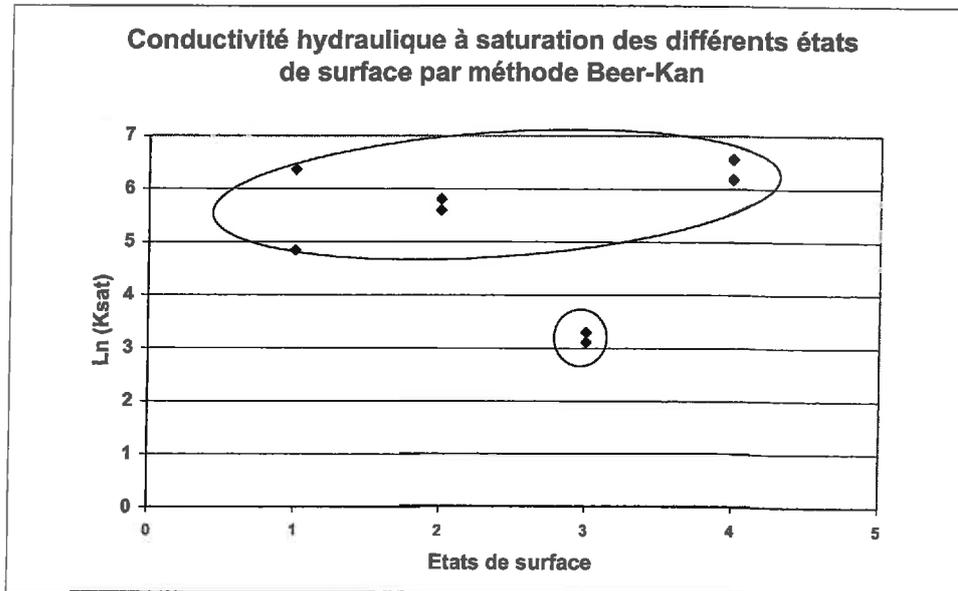


Figure 16 : valeurs de conductivité hydraulique obtenues par la méthode Beer-Kan

L'état de surface 3 est caractérisé par une faible capacité d'infiltration (moyenne de 25 mm/h), contre plusieurs centaines de millimètres par heure pour les autres états de surface. Les mesures ultérieures d'infiltration dans la placette avec les infiltromètres Decagon confirment ce résultat (tableau 3). Les K_s en profondeur (-30 cm) varient entre 250 mm/h et 750 mm/h.

Résultats d'infiltration par infiltromètre à disque Decagon sur la placette

Les données d'infiltration obtenues dans la placette ont été traitées par la méthode multipotentielle décrite au paragraphe 3.2.1, méthode qui semble donner des valeurs plus proches des valeurs attendues (<300mm/h) que la méthode par régression linéaire, un an et demi après le travail du sol de la parcelle à la rotobèche.

Dans la placette		DECAGONS Ks (mm/h)			
Emplacement	EDS	traitement par paires de potentiels		moyenne	écart-type
Pied du bananier (lysi 1)	4	93	122	93	21
Aval immédiat bananier (lysi 2)	4	114	99	106	11
Chemin d'eau	2	359	304	331	39
A côté du chemin d'eau (croûte)	3	79	80	80	1
Zone d'égouttage	2	108	-	108	-
Exutoire	3	26	27	27	1
Exutoire	3	40	52	46	8

Tableau 3 : valeurs des conductivités hydrauliques à saturation par Decagon dans la placette

Les conductivités hydrauliques des différents emplacements de la placette peuvent être comparées entre elles. Des zones à faible capacité d'infiltration sont ainsi mises en évidence. La répartition des conductivités hydrauliques est présentée sur la carte de la figure 17. L'étude de la figure permet de mettre en évidence une zone à faible conductivité hydraulique dans le bas de la placette (exutoire). Les valeurs au pied du bananier et directement en aval sont du même ordre de grandeur que la valeur obtenue dans la « zone d'égouttage » au centre de la placette. Le sol au niveau de l'ancien chemin d'eau présente une forte capacité d'infiltration par rapport au pied du bananier.

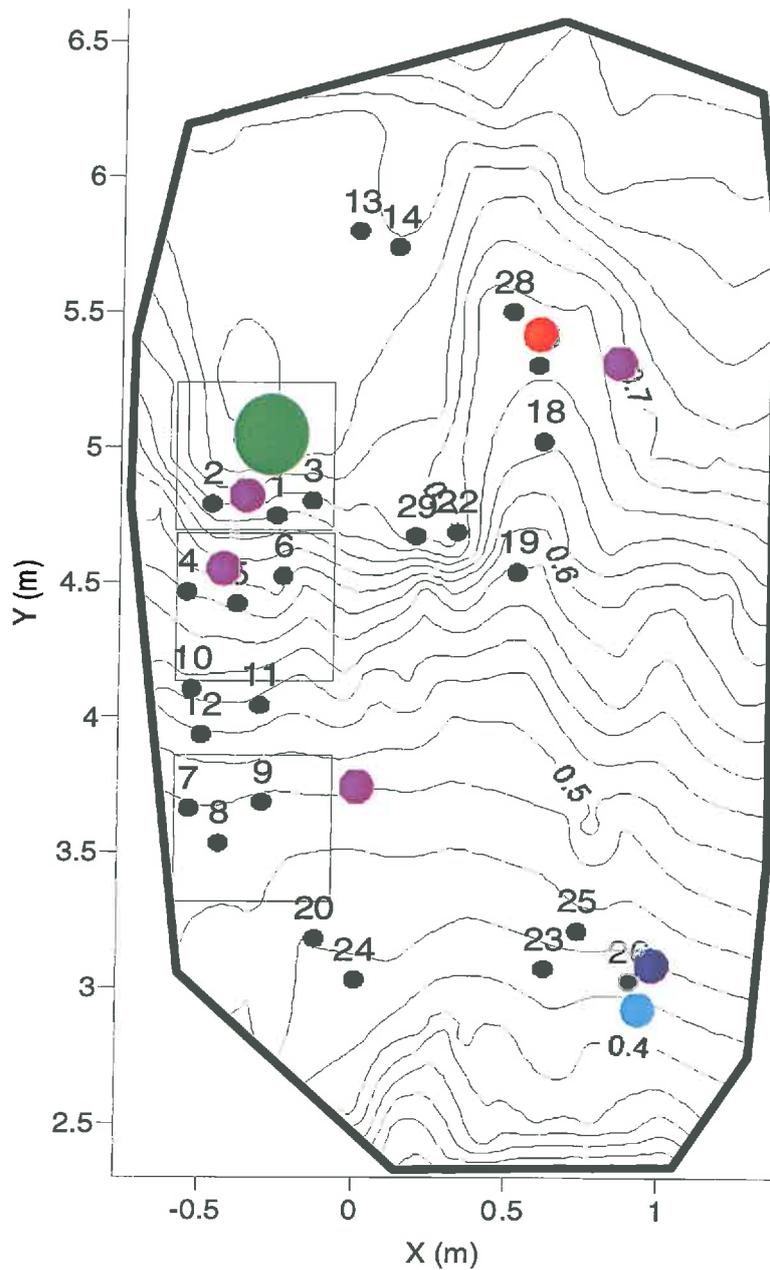


Figure 17 : Répartition des valeurs de conductivités hydrauliques

Conductivités hydrauliques (mm/h)

- > 300 mm/h
- environ 100 mm/h
- 50 mm/h
- 25 mm/h
- bananier
- lysimètre

3.3. Etude dynamique des flux d'eau

3.3.1. Présentation des événements pluvieux étudiés

Les événements utilisés pour l'étude des potentiels matriciels sont décrits dans le tableau 4, ceux servant à l'étude du drainage et du ruissellement sont indiqués dans le tableau 5.

Evènement	Date	Heure de début de précipitation	Durée de la précipitation	Lame d'eau précipitée)	Intensité maximum	Lame d'eau précipitée les dernières 24h
PM 1	11/07/04	01h22mn	68 mn	6,4 mm	48 mm	0,2 mm
PM 2	11/07/04	06h58mn	114 mn	23,2 mm	96 mm	8,4 mm
PM 3	27/08/04	22h27mn	127 mn	52,2 mm	108 mm	37,2 mm

Tableau 4 : Evènements pluvieux retenus pour l'étude des potentiels matriciels

Les événements utilisés pour interpréter les données tensiométriques ont été choisis selon la quantité de pluie précipitée avant et après l'événement. L'objectif dans le choix des épisodes pluvieux était de pouvoir observer une augmentation et une diminution des potentiels sans interférence avec d'autres événements pluvieux. Les requêtes Excel ont facilité la recherche de ces événements.

Remarque : les tensiomètres 22 et 25 (tensiomètres de surface) ne fonctionnaient pas lors de l'événement PM3.

Etude des flux de drainage et de ruissellement des événements suivants :

Evènement	Date	Heure de début de précipitation	Durée de la précipitation	Lame d'eau précipitée	Intensité maximum	Lame d'eau précipitée les dernières 24h
Evènement 1	03/07/04	03h57mn	12 mn	6,4 mm	105 mm/h	9,6 mm
Evènement 2	28/07/04	02h15mn	67 mn	13,2 mm	60 mm/h	1,4 mm
Evènement 3	27/08/04	22h27mn	127 mn	52,2 mm	108 mm/h	37,2 mm

Tableau 5 : Evènements pluvieux retenus pour l'étude du drainage et du ruissellement

Le drainage se poursuivant parfois pendant plus de 24h, la sélection des événements pluvieux a été réalisé selon des critères plus sélectifs que pour l'étude des données tensiométriques :

- Lame d'eau précipitée durant les trois heures précédentes inférieure à 2 mm
- Lame d'eau précipitée durant les 24h suivantes inférieures à 10 mm en ne permettant pas dans ces 24h d'événements pluvieux unitaires supérieurs à 3 mm.

Ces contraintes ont amené au choix de ces trois événements.

Remarque : le troisième événement est commun aux 2 études (tensiométrie et lysimétrie + ruissellement).

3.3.2. Etudes des valeurs de potentiels matriciels sur trois évènements pluvieux

Les valeurs extrêmes de potentiels matriciels se situent entre $-4,5$ m et $-0,07$ m (valeurs maximum et minimum observées pour les tensiomètres de surface). L'étude des histogrammes de la figure 18 indique la répartition des valeurs de potentiels matriciels suivant la profondeur dans le sol avant et après précipitation :

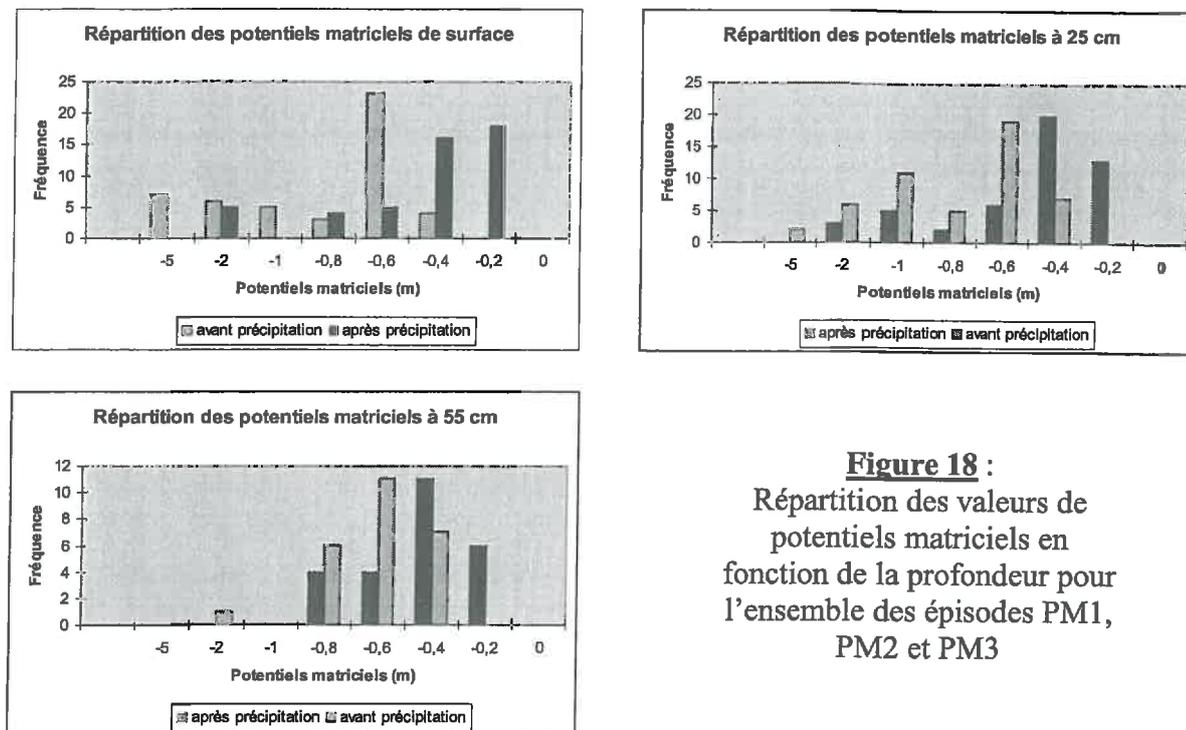


Figure 18 :
Répartition des valeurs de potentiels matriciels en fonction de la profondeur pour l'ensemble des épisodes PM1, PM2 et PM3

Avant la pluie, on observe en surface les potentiels les plus variés et de valeur moyenne la plus faible. Plus on descend plus la valeur moyenne du potentiel augmente et plus sa gamme de variation se réduit, ce qui correspond à un profil classique en phase d'évaporation. Après la pluie, le potentiel augmente d'environ 0,2 m en moyenne traduisant une recharge en eau globale du profil. Une plus forte augmentation est visible en surface, où le potentiel moyen prend une valeur légèrement supérieure à 25 et 55 cm. Les tensiomètres de surface subissent les plus fortes variations de potentiels, le sol dans ses premiers centimètres étant fortement soumis aux sollicitations climatiques (pluie, évaporation).

3.3.3. Typologie de l'évolution des potentiels matriciels au cours d'une pluie

3 types de courbes de potentiels ont été observés (cf.figure 19) :

Type 1 (peu réactif) : pas ou peu de variation de potentiel au cours de la pluie.

Type 2 (moyennement réactif): variation lente, temps de retour long (le temps de retour est le temps que met le sol à revenir à son potentiel initial).

Type 3 (très réactif) : variation rapide, temps de retour que pour le type 1.

Ces différents types d'évolution ont été observés à toutes les profondeurs tensiométriques.

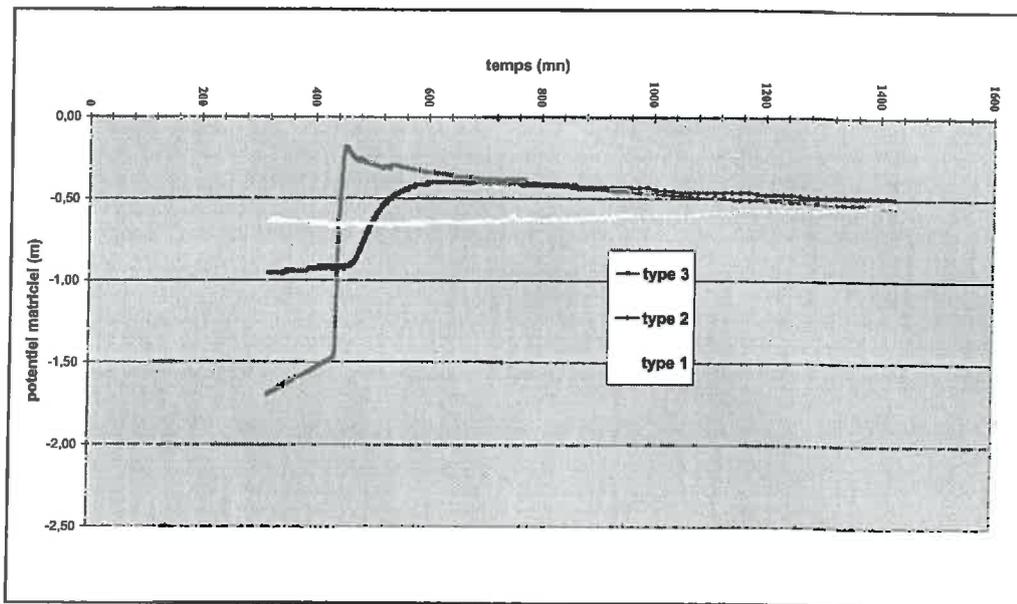


Figure 19 : types d'évolution de courbes pendant une pluie

Les courbes de type 1 permettent d'identifier les emplacements ou les profondeurs de sol qui ne subissent pas l'influence de la lame d'eau infiltrée. La courbe de type 2 présente les caractéristiques d'un écoulement d'eau en milieu poreux décrit par la formule de Darcy (remplissage des micropores de l'andosol, suivi d'un drainage lent, de type matriciel). L'augmentation rapide du potentiel matriciel de type 3 permet de mettre en évidence des zones de remplissage macroporale. Cette macroporosité semble présente de manière diffuse dans les andosols (zone racinaire, agrégats). Ce remplissage est suivi d'un drainage rapide par écoulement préférentiel jusqu'à un potentiel matriciel compris entre -0,20 m et -0,30 m puis par un drainage plus lent.

Les histogrammes de la figure 20 montrent que plus la pluie augmente, plus on observe des conditions d'écoulement préférentiel. D'une manière générale, les tensiomètres de surface ont une réponse de type 3. Les tensiomètres implantés plus en profondeur présentent des courbes de types variables, dépendant de la lame d'eau précipitée et de l'état d'humidité du sol. Les types les plus souvent observés sont les types 1 et 2, mais au pied du bananier et légèrement en aval, les tensiomètres à 55 cm de profondeur peuvent subir des variations rapides de type 3 traduisant une possible influence du flux d'eau infiltré issu du stemflow.

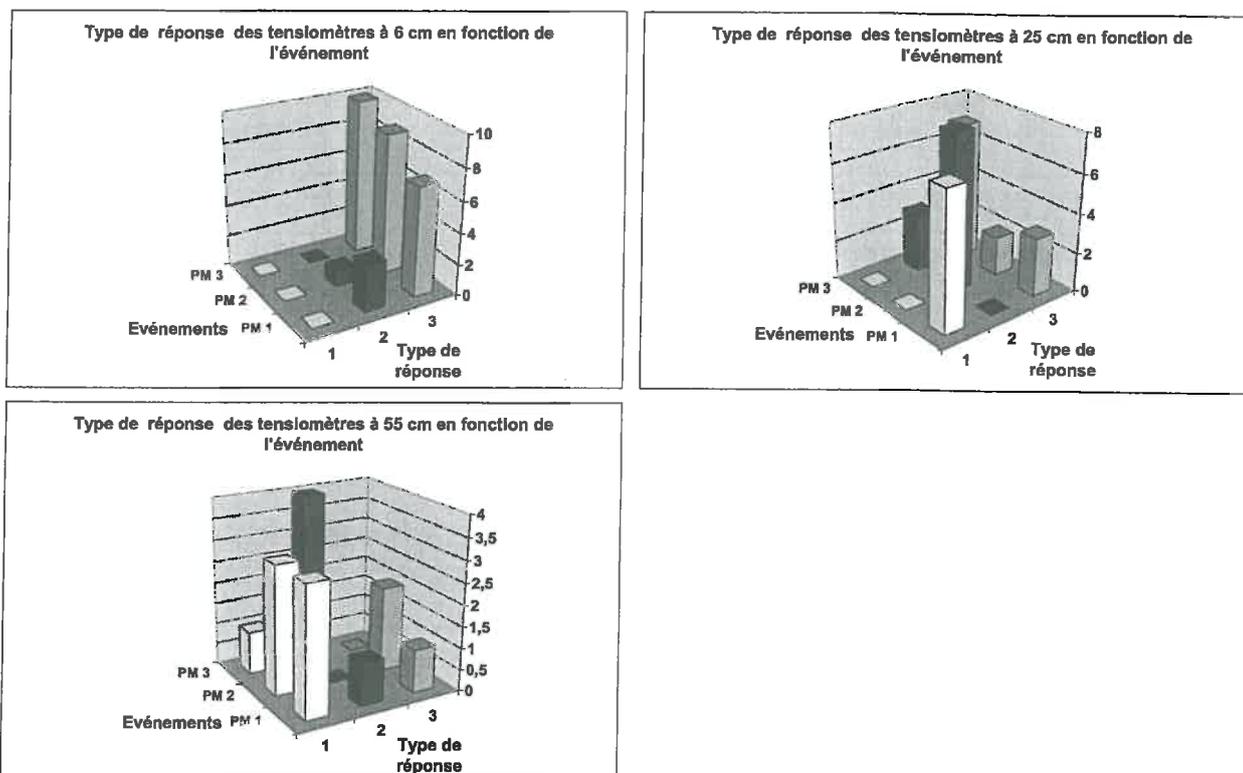


Figure 20 : Types de réponse des tensiomètres en fonction de la profondeur et de l'événement

Interprétation dynamique des potentiels matriciels

Le **temps de montée** (t_m) correspond au temps mis par le sol à une profondeur donnée pour atteindre son potentiel matriciel maximum, à partir du début de la précipitation. Classiquement, pour des profondeurs croissantes, les potentiels matriciels maximum devraient être atteints avec des temps de montée de plus en plus long, à condition d'avoir une distribution homogène de la pluie à la surface et qu'il n'y ait pas de transferts préférentiels ou latéraux dans le sol (cf. figure 23). Pour chaque événement pluvieux étudié, les temps de montées ont été déterminés pour chacun des tensiomètres. Les résultats sont présentés en annexe – caractéristiques des courbes tensiométriques.

La figure 21 présente les courbes de variations des potentiels matriciels des tensiomètres situés à l'aplomb des lysimètres 1, 2 et 3, ainsi qu'à l'exutoire de la placette. Ces courbes permettent de comparer les temps de montée de l'eau du sol à différentes profondeurs (t_1 , t_2 et t_3) et entre les emplacements, ainsi que les valeurs des potentiels matriciels.

La figure 22 permet de visualiser les valeurs des potentiels matriciels en surface à trois instants t_1 , t_2 et t_3 , pour chaque événement pluvieux étudié au début des précipitations (t_1), une demi-heure plus tard (t_2) et 2 heures après le début de la pluie (t_3).

- **Etat d'humidité permanent du sol en profondeur**

L'étude de la figure 21 permet d'observer que les potentiels matriciels du sol en profondeur varient peu et restent relativement élevés. Une lame d'eau drainée de faible hauteur n'influence que très peu les valeurs de potentiel matriciel en profondeur, ce qui peut expliquer qu'en dehors de la zone de contribution du stemflow à la base du bananier, l'état d'humidité du sol en profondeur varie peu.

Figure 21 : Courbes de variations des potentiels matriciels des lysimètres 1, 2 et 3 et à l'exutoire lors de trois évènements pluvieux

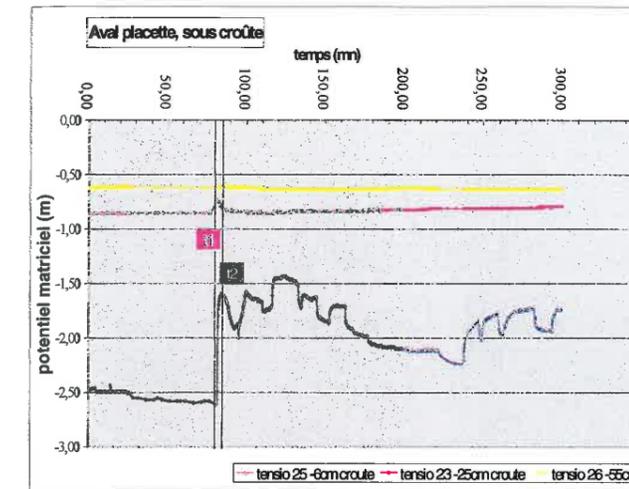
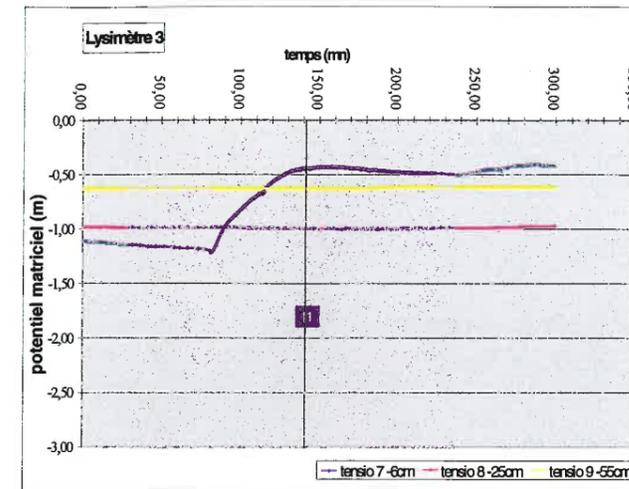
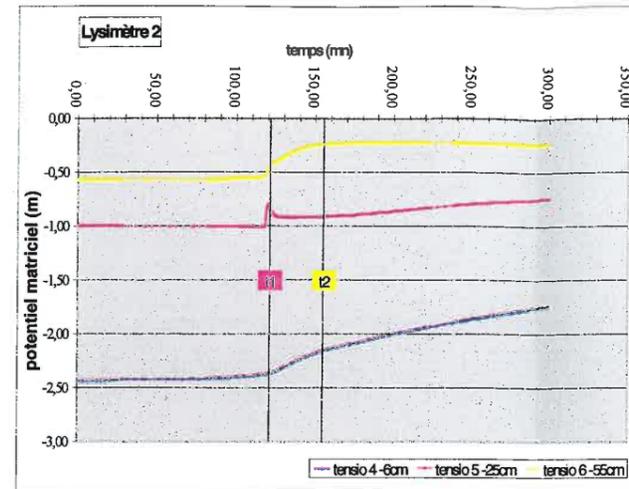
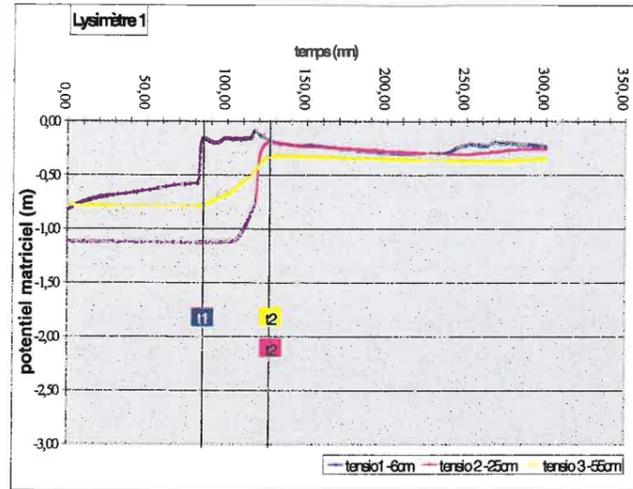
**LYSIMETRE 1 :
PIED DU BANANIER**

**LYSIMETRE 2 :
AVAL IMMEDIAT
DU BANANIER**

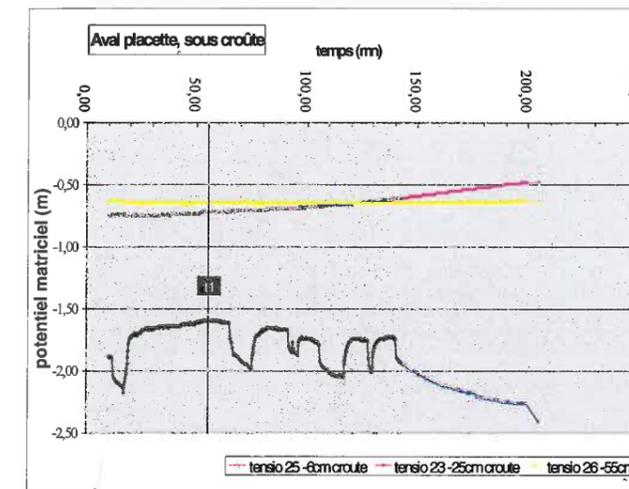
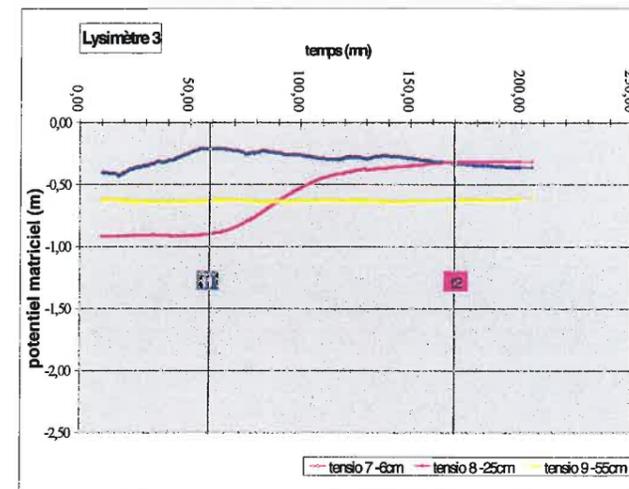
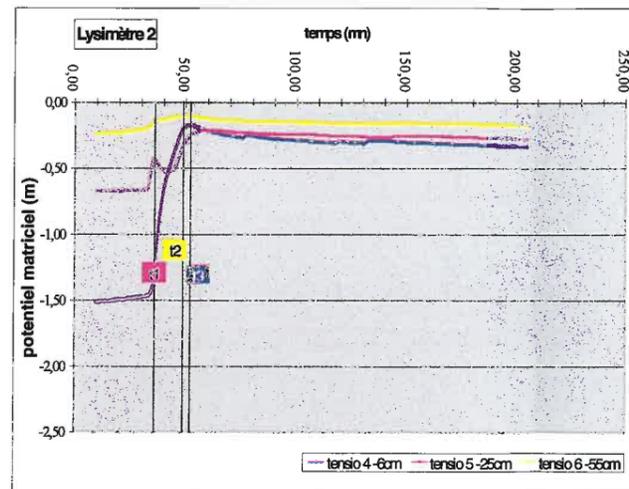
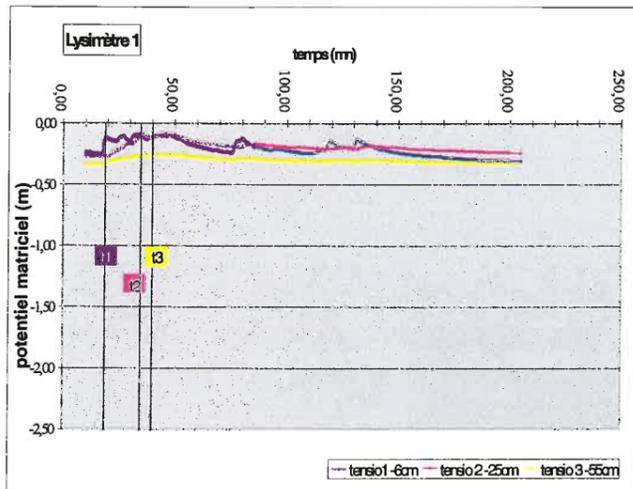
**LYSIMETRE 3 :
MILIEU DU RANG
ENTRE 2 BANANIER**

**AVAL PLACETTE
SOUS CROÛTE**

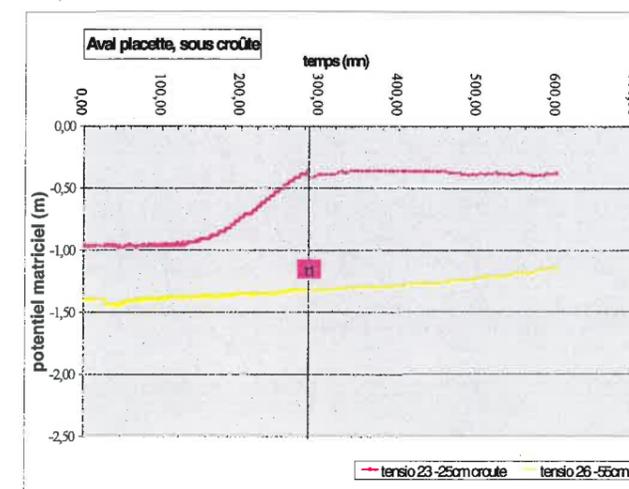
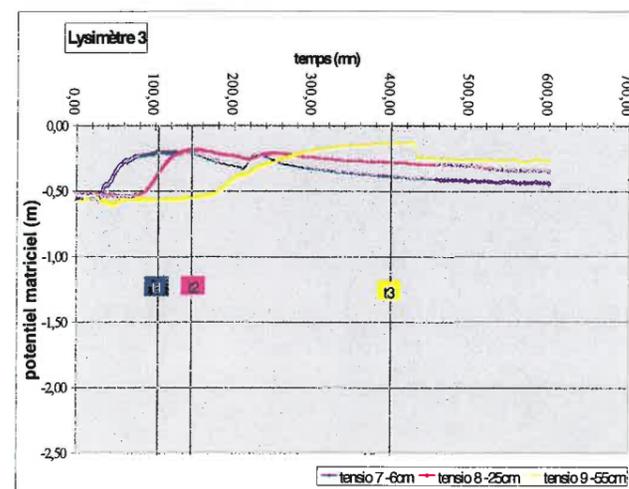
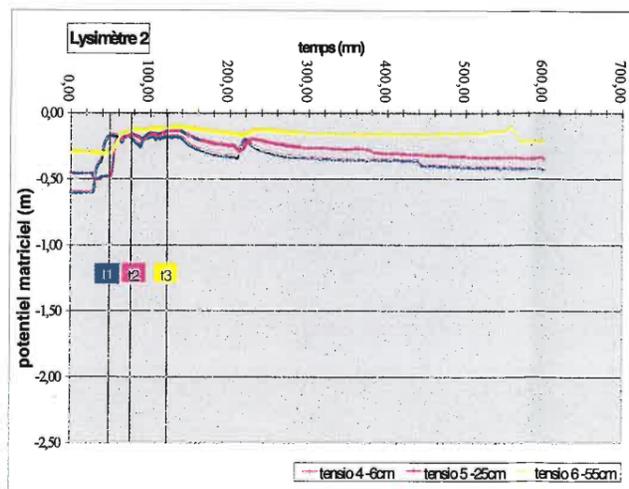
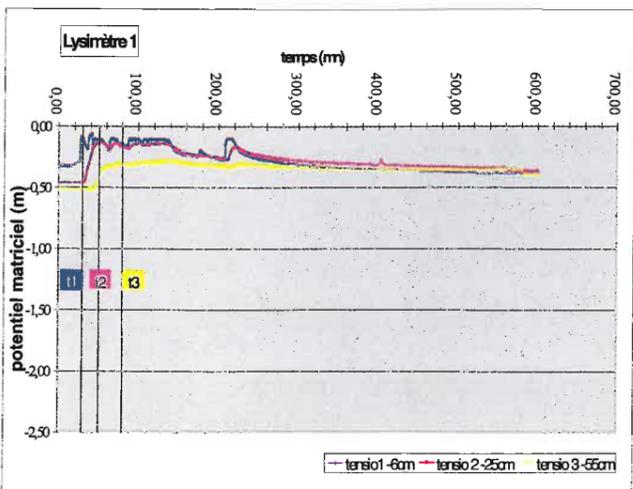
PM 1



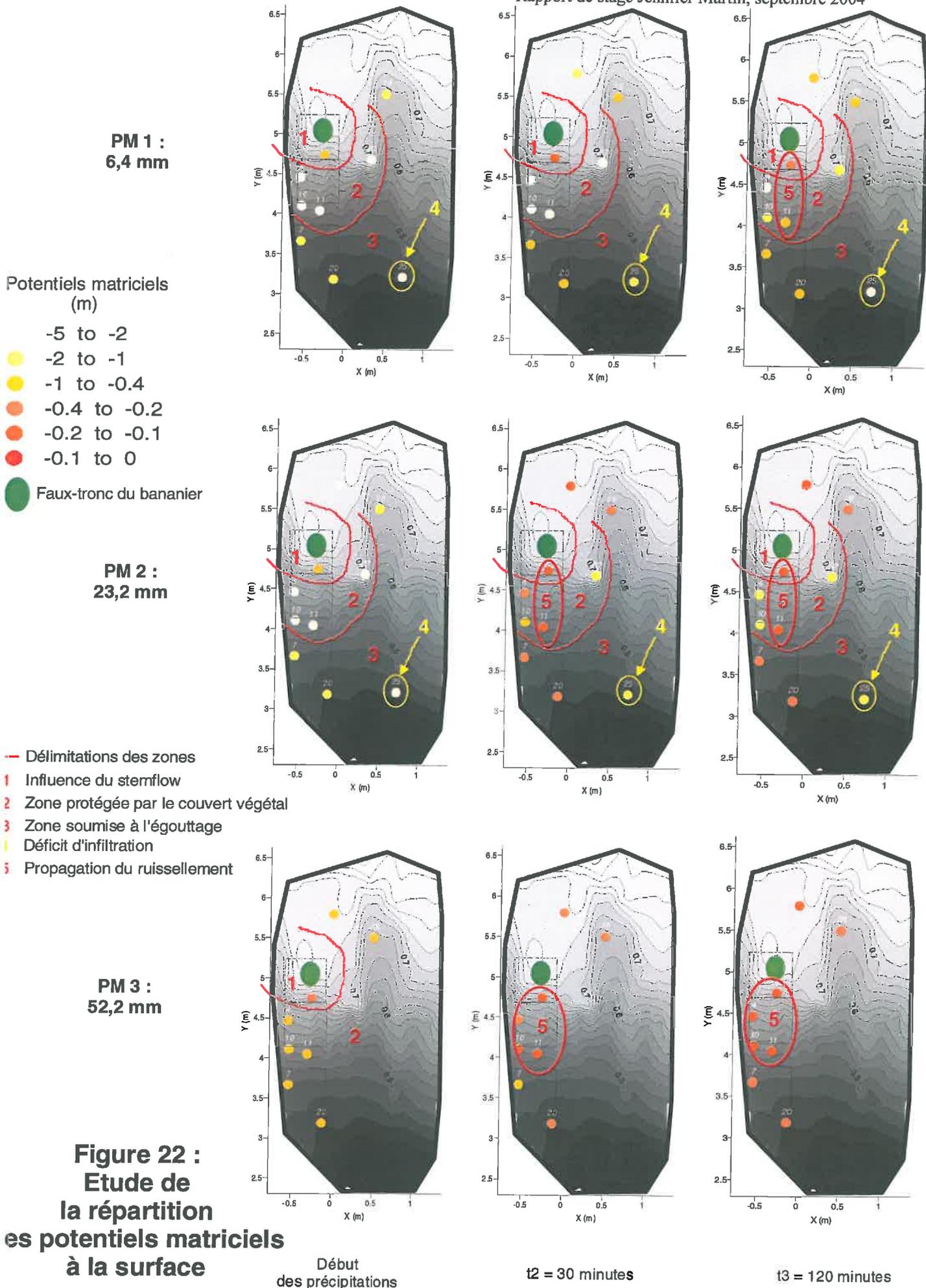
PM 2



PM 3



■ Tensiomètre de surface ■ Tensiomètre à 55 cm de profondeur
■ Tensiomètre à 25 cm de profondeur t1, t2, t3 : ordre de durée des temps de montée



3.3.4. Mise en évidence de l'influence du stemflow sur le drainage

A la base du bananier (au-dessus du lysimètre 1) : pour tous les événements la courbe de potentiel en surface présente les temps de montée les plus courts de toute la placette (en moyenne 7 mn sur les événements étudiés). Les tensiomètres à 25 et 55 cm atteignent leur potentiel matriciel maximum sur une durée plus courte (respectivement 30 et 40 minutes) que la majorité des autres tensiomètres profonds (durée moyenne de 2h50mn) (cf. figure 21). Le type 3 des courbes des tensiomètres du lysimètre 1 indique **une infiltration préférentielle sous le bananier, conséquence logique du fait que le sol au pied du bananier est directement soumis au flux d'eau infiltré issu du stemflow.**

3.3.5. Mise en évidence d'un drainage latéral

3.3.5.1. Etude des potentiels matriciels :

Au niveau du lysimètre 2, situé immédiatement en aval du lysimètre 1, le potentiel matriciel du sol est plus élevé en profondeur qu'en surface et l'augmentation des valeurs de potentiel débute au même instant sur l'ensemble de la couche de sol (figure 21). Pour les événements PM1 et PM2, les temps de montée les plus courts correspondent aux potentiels matriciels en profondeur, ce qui exprime un fonctionnement inverse au fonctionnement classique. Ce comportement peut être expliqué par le fait que la lame d'eau infiltrée issue du stemflow développe, sous l'effet de la pente de la placette et de la discontinuité des propriétés hydrodynamiques entre les horizons A et B, une composante horizontale du transfert orientée vers le lysimètre 2 (figure 23).

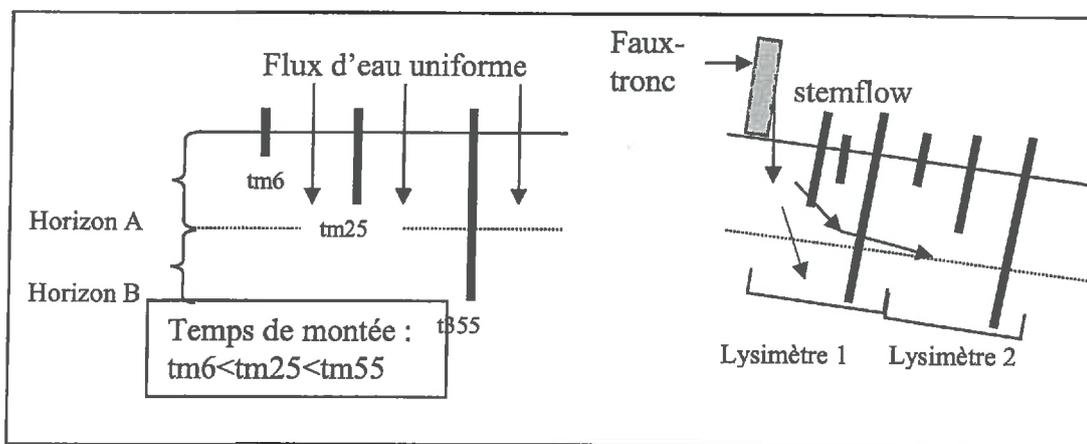


Figure 23 : schéma explicatif d'une composante horizontale du transfert d'eau dans le sol

Au niveau de l'exutoire, la figure 22 permet d'observer que les valeurs de potentiels matriciels sont plus élevées en profondeur qu'en surface. Ceci s'explique vraisemblablement à nouveau par un transfert horizontal, étant donné la faible recharge en eau du sol par la surface dans cette zone. Ce dernier point concorde avec les résultats présentés sur la carte de répartition des conductivités hydrauliques de la figure 17.

Plus en aval dans le rang au niveau du lysimètre 3, on retrouve le schéma classique d'infiltration (figure 21), les arrivées d'eau par la surface ne sont pas limitées et/ou le flux d'eau issu du stemflow semble ne pas atteindre le sol au niveau de ce lysimètre. Le cheminement de l'eau dans le sol vers l'exutoire est donc complexe et dépend des propriétés hydrodynamiques et des humidités locales.

3.3.5.2. Etude des volumes drainés lors de la campagne d'acquisition de données avec le stemflow intercepté.

La figure 24 présente les hauteurs d'eau drainée en fonction des hauteurs d'eau précipitée. La quantité d'eau drainée augmente progressivement avec la quantité d'eau précipitée lorsque le stemflow n'est pas intercepté (symboles bleu et rouge sur la figure 24). Les coefficients de restitution drainage/pluie sont supérieurs à 1 au niveau du lysimètre 2, la lame drainée étant supérieure à la lame précipitée pour un événement donné. Lorsque la collerette a été installée autour du faux-tronc et que l'eau s'écoulant le long du faux-tronc a été évacuée hors de la placette sans être redistribué au pied du bananier, les volumes drainés dans les lysimètres 1 et 2 ont alors beaucoup diminué (figure 24). Ces résultats mettent en évidence que l'eau drainée sous le bananier et légèrement en aval est issue presque exclusivement du stemflow (les volumes drainés sont inférieurs à 3,5 mm lorsque le stemflow est intercepté). Lors de l'expérience, il n'a pas été possible d'obtenir des résultats concernant les hauteurs d'eau drainées avec stemflow pour des précipitations comprises entre 5 mm et 50 mm. Cependant, les données lysimétriques obtenues par P. Cattán sur cette même parcelle lors d'une campagne en 2001-2002 (Cattán, 2004) permettent d'assurer que dans cette gamme de précipitation, les hauteurs d'eau drainées devraient être supérieures celles mesurées avec interception du stemflow.

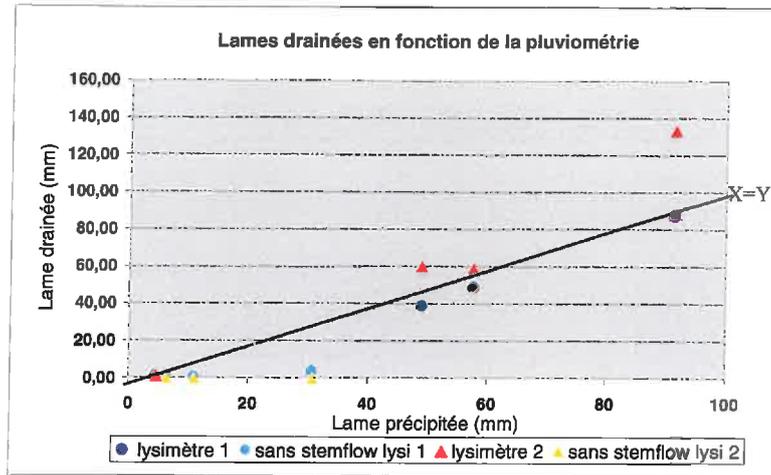


Figure 24 : Influence du stemflow sur les lames d'eau drainées à l'aplomb du bananier et immédiatement en aval

La figure 24 permet également d'observer que pour une même lame d'eau précipitée le lysimètre 2, en aval du bananier, draine plus que le lysimètre 1, au pied du bananier. En revanche, dans le cas où il n'y a pas redistribution du stemflow, les hauteurs d'eau sont identiques, voir légèrement inversées (un peu plus de drainage au pied du bananier), ce qui confirme la théorie précédemment évoquée (figure 23).

3.3.5.2. Conclusion partielle

D'après l'interprétation combinée des données tensiométriques et des volumes drainés au niveau des lysimètres 1 et 2, on attribue donc la lame d'eau infiltrée au pied du bananier quasi-exclusivement au stemflow. Cette lame développe une composante horizontale de transfert orientée vers le lysimètre 2. Le stemflow concentrant la lame d'eau précipitée, les coefficients de restitution drainage/pluie sont supérieurs à 1 au niveau du lysimètre 2. Un transfert horizontal est également observé au niveau de l'exutoire, ce qui permet de penser que le drainage latéral est commun à l'ensemble de la placette, mais plus ou moins marqué selon les arrivées d'eau par la surface.

3.3.6. Mise en évidence du ruissellement

3.3.6.1. Etude des potentiels matriciels en surface:

L'étude des variations des potentiels de surface au cours d'un événement pluvieux permet de mettre en évidence plusieurs zones à la surface du sol présentant les mêmes caractéristiques (figure 22) :

Zone 1 : le potentiel matriciel de surface au pied du bananier est initialement élevé et augmente fortement dès le début des précipitations sous l'influence directe du stemflow.

Zone 2 : les potentiels matriciels dans cette zone restent faibles au cours des précipitations, comparativement à la zone 3. La surface du sol autour du bananier est protégée des précipitations par le couvert végétal (effet « parapluie » de la partie des feuilles inclinée vers le faux-tronc).

Zone 3 : L'augmentation des potentiels matriciels au niveau des tensiomètres de surface dans la zone 3 peut s'expliquer par l'égouttage très localisé des feuilles et/ou par la pluie incidente non interceptée par le couvert végétal.

Zone 4 : le potentiel matriciel du sol en bas de placette (tensiomètre 25) reste faible même au cours des événements pluvieux, ce qui peut s'expliquer par la faible capacité d'infiltration du sol au niveau de l'exutoire de la placette (zone croûtée).

Zone 5 : aux instants t2 et t3, on observe que la surface du sol subit une augmentation de son potentiel matriciel dans l'axe de la pente à partir du pied du bananier, alors que cette zone est normalement protégée par le couvert végétal. On peut attribuer cette augmentation à la lame d'eau ruisselée générée par le stemflow.

L'étude de la figure 22 permet d'observer un départ de ruissellement à partir du pied du bananier vers l'aval. Le flux d'eau issu du stemflow engendre donc une lame d'eau ruisselée observable grâce aux tensiomètres automatiques sur quelques dizaines de centimètres sans qu'il soit possible de conclure, à ce stade, quant à la participation du stemflow au volume total d'eau ruisselée observé sur la placette.

3.3.6.2. Etude des volumes ruisselés lors de la campagne d'acquisition de données avec le stemflow intercepté.

Les figures 25 et 26 présentent le coefficient de ruissellement (ratio lame ruisselée/lame précipitée) sur la placette en fonction respectivement de la lame d'eau précipitée et de l'intensité pluvieuse maximum sur une minute de l'événement pluvieux. Ces figures ont été établies à partir des données des volumes globaux de drainage et de ruissellement lors des événements, présentés en annexe 7.

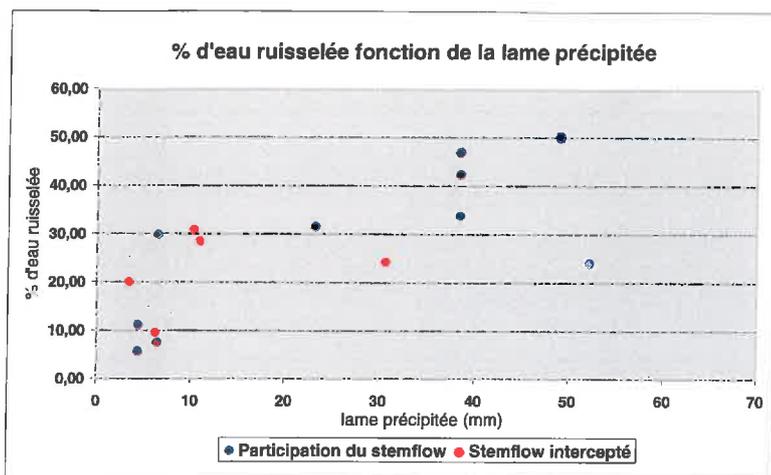


Figure 25 :
Influence du stemflow sur le ruissellement en fonction de la lame d'eau précipitée

Sur la figure 25, les pourcentages de ruissellement avec et sans stemflow ne se différencient pas. Il semble donc que l'influence du stemflow sur le volume d'eau ruisselé ne dépend pas de la quantité d'eau de pluie précipitée. Cependant, au cours de l'expérience d'interception du stemflow, les événements pluvieux étudiés n'ont pas été supérieurs à 35 mm. La figure 26 permet de conclure à une influence de l'intensité pluvieuse sur la participation de la lame d'eau ruisselée issu du stemflow au ruissellement total. Pour de faible intensité pluvieuse (<60 mm/h sur une minute), le pourcentage d'eau ruisselée ne varie pas en fonction de l'interception ou non du stemflow (zone 1). Par contre, on observe une diminution du pourcentage d'eau ruisselé lorsque le stemflow est intercepté (zone 3 versus zone 2).

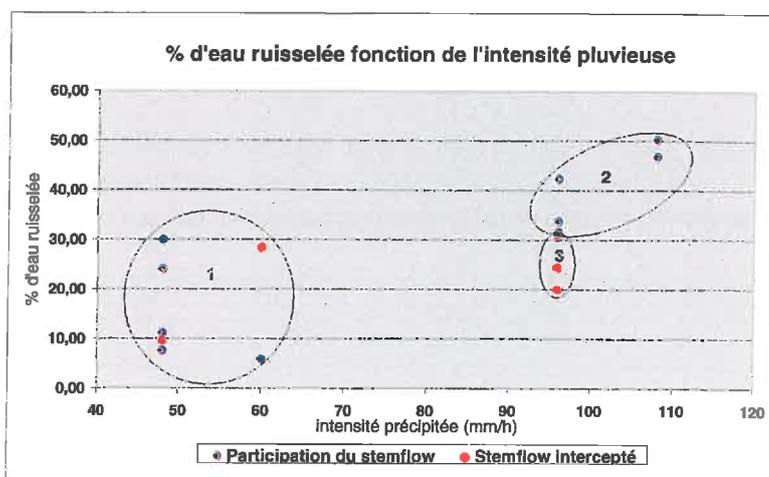


Figure 26 : Influence du stemflow sur le ruissellement en fonction de l'intensité pluvieuse

3.3.6.3. Conclusion partielle

L'interprétation de ces deux figures permet donc de conclure qu'une partie du volume d'eau recueilli dans le bac de ruissellement est issu de la fraction ruisselante du stemflow (l'autre fraction étant infiltrée puis drainée) lors d'événements pluvieux de forte intensité (au moins supérieur à 65 mm/h pendant une minute). Pour de faibles intensités, lorsque qu'il y a ruissellement à partir de la base du bananier, l'eau ne parcourt que quelques dizaines de centimètres vers l'aval avant de s'infiltrer, ce qui est en accord avec la figure 22.

3.3.7. **Etude des temps de réponse et des temps de montée des flux de drainage et de ruissellement**

Le **temps de réponse** est défini comme la durée s'écoulant entre le début des précipitations (premier basculement d'auget) et la première observation d'un flux ruisselé ou drainé (le capteur de pression dans le bidon ou dans le bac de ruissellement enregistre une augmentation de la hauteur d'eau). Le **temps de montée** est défini comme la durée s'écoulant entre le début des précipitations (premier basculement d'auget) et le flux maximum atteint.

La figure 27 présente trois hydrogrammes correspondant aux trois événements présentés au § 3.3.1.

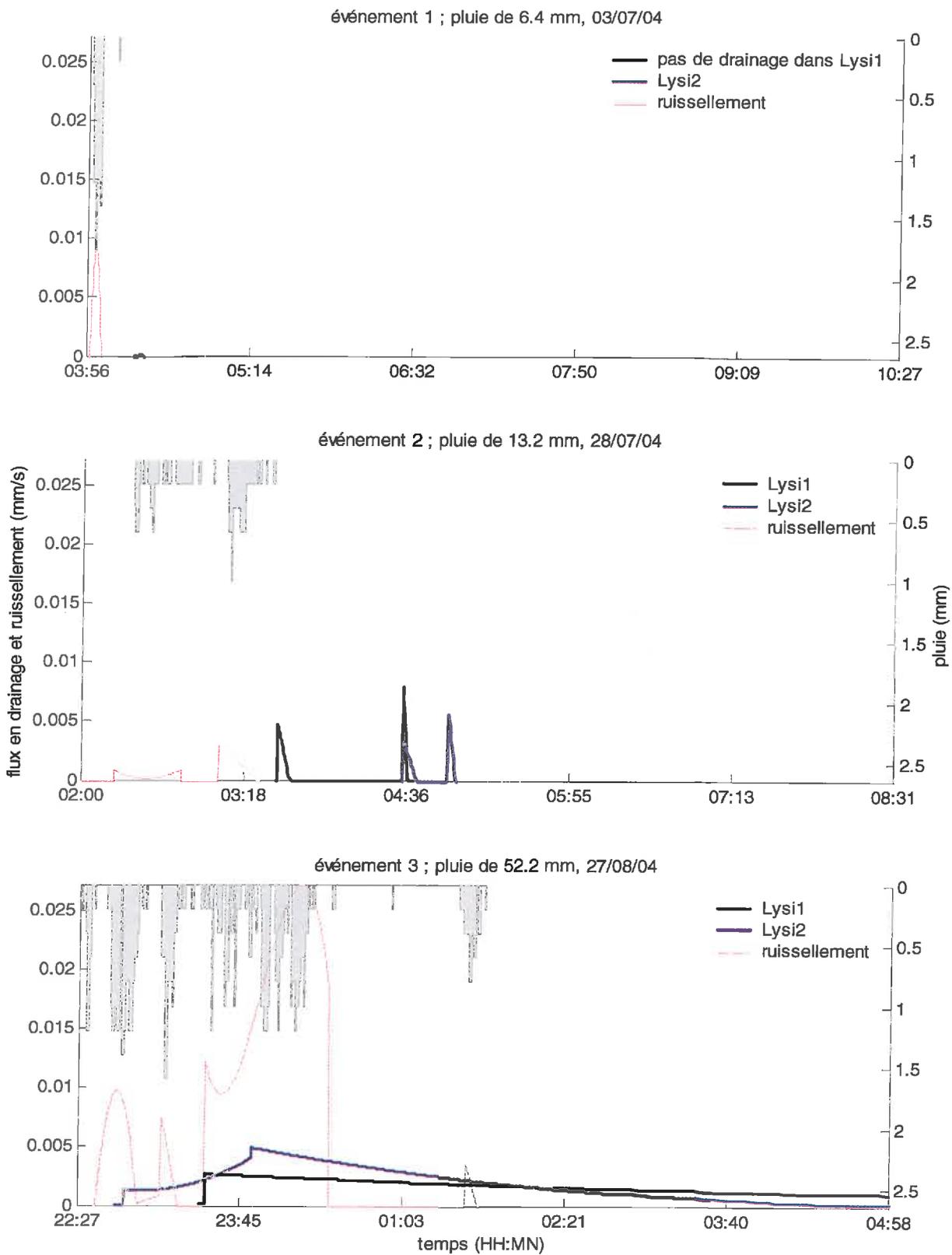


Figure 27 : Hiétoigrammes et hydrogrammes de drainage et de ruissellement

Pour les deux premiers événements, le déclenchement du ruissellement est de l'ordre de la minute, pour le troisième événement, celui-ci se déclenche 8 minutes après le début de la précipitation. Le flux maximum ruisselé correspond dans chaque cas à l'intensité maximum de la pluie.

L'événement 1 correspond à une pluie très intense et courte. Le flux de ruissellement est également très intense et le drainage très faible, voire inexistant au pied du bananier. L'étude des deux autres événements permet d'observer que le flux de drainage peut-être plus élevé que le flux ruisselé (événement 2). De plus, il semble que ce ne soit pas nécessairement en aval du bananier (lysimètre 2) que le drainage commence : pour l'événement 2, c'est au pied du bananier que l'on observe les premières arrivées d'eau.

Il est intéressant de noter que le flux drainé est plus intense au niveau de la zone où le drainage a débuté (lysimètre 1 pour l'événement 1 et lysimètre 2 pour l'événement 2). Mais cette observation devrait être vérifiée sur d'autres événements pour pouvoir en faire une règle de fonctionnement hydrique.

	Lysimètre 1 (pied de bananier)			Lysimètre 2 (aval du bananier)		
	Evt 1	Evt 2	Evt 3	Evt 1	Evt 2	Evt 3
Temps de réponse	-	80 mn	70 mn	23 mn	140 mn	18 mn
Temps de montée	-	80 mn	70 mn	25 mn	140 mn	83 mn

Tableau 6 : valeurs des temps de réponse et de montée pour les trois événements pluvieux étudiés

3.4. Synthèse du fonctionnement hydrologique global de la placette

D'après l'étude des données expérimentales, les processus hydriques à la surface du sol sous bananeraie sont intensément liés à la redistribution spatiale de la pluie incidente par le couvert végétal essentiellement via le stemflow et l'égouttage, et la variabilité des propriétés hydrodynamiques du sol.

Les flux d'eau en profondeur semblent caractérisés, outre un flux de drainage spatialisé, par un transfert horizontal essentiellement unidirectionnel dans l'axe de la pente, sur l'ensemble de la placette. Ce comportement est particulièrement marqué au pied du bananier où

l'infiltration préférentielle du flux d'eau issu du stemflow se traduit par un drainage intense, qui se propage jusqu'à deux mètres en aval du bananier.

Pour des intensités de pluie modérées (< 60 mm/h), le stemflow a peu d'influence sur la lame d'eau ruisselée qui arrive jusqu'à l'exutoire de la placette. Cependant, une contribution peut être observée lors d'événements pluvieux très intenses (> 90 mm/h), relativement fréquents sous le climat tropical humide de la Guadeloupe.

Le couvert végétal ne permet pas à la pluie incidente d'atteindre le sol sur une circonférence d'1 m à 1,5 m autour du bananier, puis il est à l'origine d'une concentration de l'eau de pluie en dehors de cette zone. Des « flaques » d'eau se forment très rapidement après le début de la pluie dans la zone d'égouttage et cela malgré une forte capacité d'infiltration (environ 100 mm/h) de ce sol dépourvu de croûte et de mousse.

Proposition de chronologie (figure 28) :

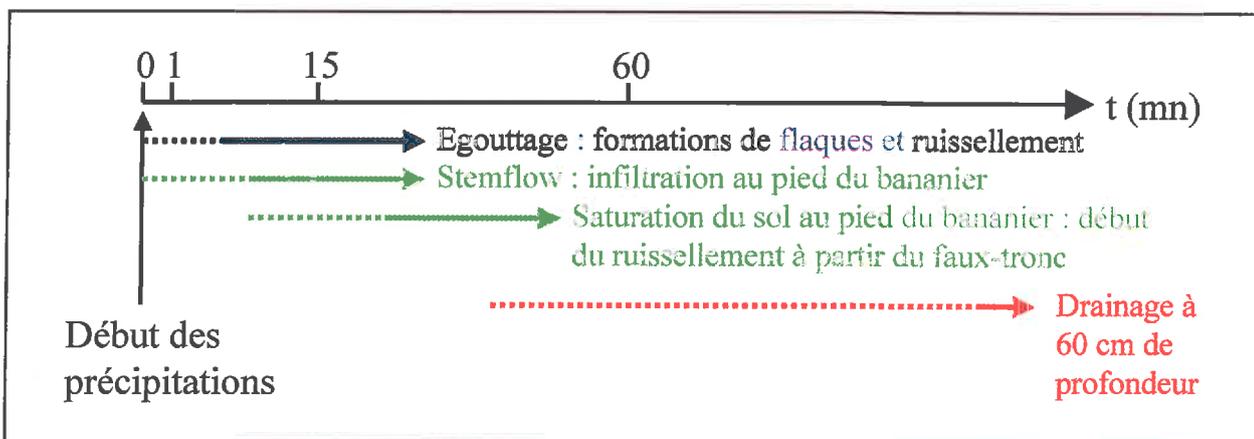


Figure 28 : proposition de chronologie du fonctionnement hydrologique distribué

Les hypothèses formulées concernant l'origine du ruissellement permettent de différencier deux types de mécanismes :

- **le refus à l'infiltration**, observé aux niveaux des impacts d'égouttage, qui entraîne la formation de « flaques » d'eau et un départ de ruissellement par gravité,
- **la saturation du sous-sol** due aux flux d'infiltration, qui est observée essentiellement au pied du bananier (engorgement du profil par infiltration rapide du stemflow).

Conclusion

L'objectif du stage était d'acquérir des données expérimentales permettant de caractériser les flux hydriques à l'échelle d'un bananier (stemflow, drainage, ruissellement, état hydrique du sol) et d'établir une description détaillée de la surface du sol (état de surface, paramètres hydrodynamiques et structuraux) afin d'étayer les hypothèses formulées précédemment concernant le fonctionnement hydrologique du système sol-bananier sur andosol de Guadeloupe.

L'étude des paramètres hydrodynamiques du sol de la placette a permis de mettre en évidence des zones croûtées où les valeurs de conductivités hydrauliques à saturation sont nettement inférieures aux autres états de surface. Ces croûtes se développent lorsque le sol n'est pas soumis à des contraintes hydriques du type ruissellement, égouttage et infiltration. Une description de l'état de surface du sol sous bananeraie peut être une première approche dans l'étude de la répartition des flux d'eau sur la placette. L'aval immédiat du bananier, l'ancien chemin d'eau et les zones qui subissent l'égouttage des feuilles présentent des capacités d'infiltration de plus d'une centaine de millimètres par heure contre une quarantaine maximum pour les zones croûtées, que l'on trouve essentiellement en amont du bananier et à l'exutoire de la placette.

La concentration de la pluie par le feuillage induit des flux d'eau localement très intenses qui provoquent des dépassements de la capacité d'infiltration. Ils se forment alors des flaques au niveau des impacts des gouttes d'eau qui engendrent un ruissellement par effet gravitaire (la placette présentant une légère pente). Le stemflow, eau de pluie redirigée par les feuilles vers le faux-tronc, s'infiltré au pied du bananier et développe, sous l'effet de la pente de la placette et de la discontinuité des propriétés hydrodynamiques entre les horizons A et B, une composante horizontale du transfert orientée vers l'aval du bananier, dans le sens de la pente. Ce drainage latéral est également mis en évidence à l'exutoire de la placette, où la zone croûtée induit un déficit d'infiltration à la surface. Lorsque l'ensemble du profil, d'une épaisseur globale d'environ 90 cm, est saturé ou lorsque le flux d'eau arrivant au pied du bananier dépasse la capacité d'infiltration, un flux de ruissellement prenant origine au pied du bananier peut être observé. Pour de faibles intensités pluvieuses (< 60 mm/h), ce flux d'eau ruisselle et s'infiltré quelques décimètres plus en aval. Pour des intensités supérieures à 90 mm/h, une partie de ce flux d'eau ruisselée issu du stemflow participe au ruissellement global de la placette.

L'acquisition des mesures sur la placette se poursuit actuellement. Les données utilisées pour émettre les hypothèses énoncées ci-dessus ont permis une interprétation valable pour une croissance foliaire de stade LAI 2 et 3. Il n'a pas été possible de noter des différences de fonctionnement sur une expérimentation de deux mois. L'intégralité des données, acquises durant quatre mois, pourra permettre par la suite d'étudier l'évolution des flux au cours de la croissance du bananier.

L'influence de la croûte sur le ruissellement global doit être plus étudiée. Une caractérisation en laboratoire de la croûte devrait être réalisée afin d'en déterminer son type. S'agit-il d'une croûte de type biologique ? Peut-on éviter son développement et ainsi améliorer la capacité d'infiltration de la surface de l'andosol ? une expérience qui devrait être réalisée dans le cadre de l'expérience en cours consistera à casser le premier centimètre de sol de la placette afin d'étudier les flux d'eau sans cet état de surface.

Enfin, les problèmes d'érosion des andosols en Guadeloupe étant posés et étudiés à l'échelle parcellaire, il serait possible de les estimer à l'échelle de la placette, en récupérant les particules et agrégats qui s'accumulent dans le bac de ruissellement. Le poids de sol ainsi récupéré pourrait être comparé au volume ruisselé.

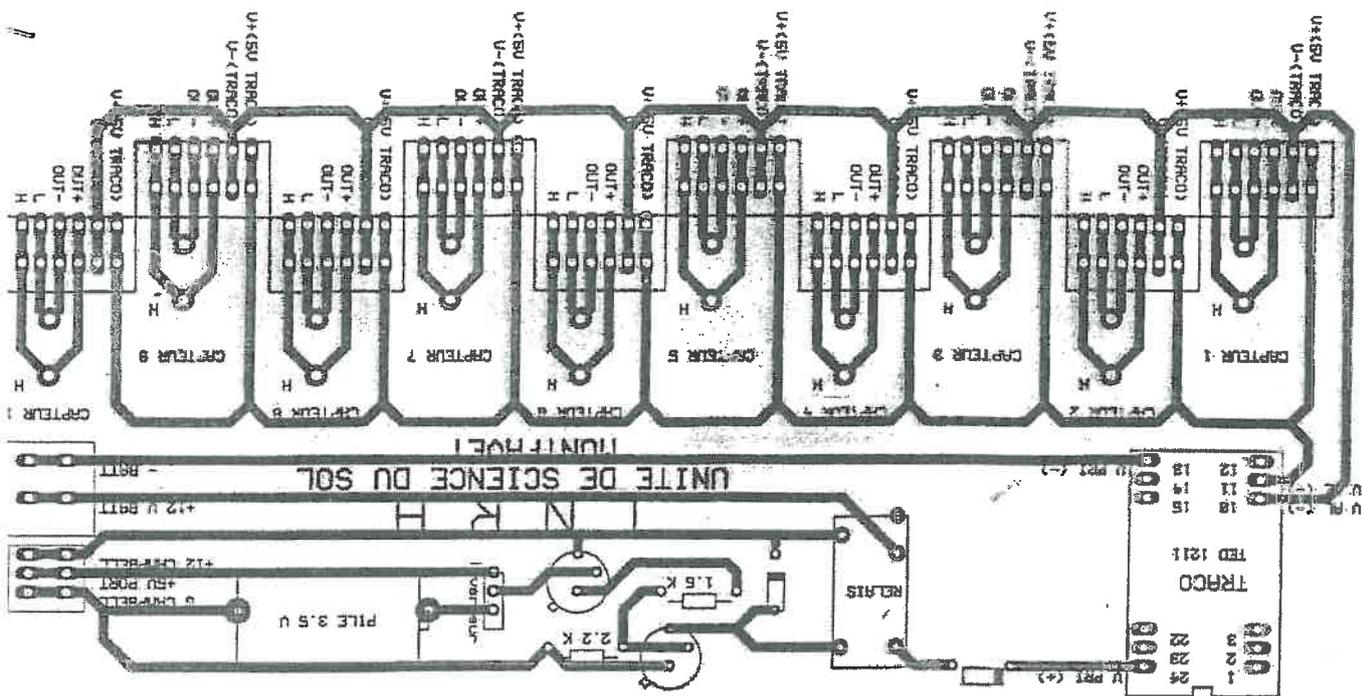
Le stage m'a permis d'approfondir mes connaissances informatiques, notamment Surfer et Excel. Il m'a permis également d'aborder une discipline que je connaissais peu : l'agronomie. Grâce aux nombreuses personnes rencontrées (chercheurs, stagiaires en agronomie mais également techniciens et ouvriers travaillant dans les bananeraies, dans les champs de canne etc.), j'ai découvert la diversité des aspects qui entourent cette science : les aspects scientifiques (l'hydrologie, la biologie, la climatologie etc.) mais également les aspects socio-économiques. C'est pourquoi je souhaite pouvoir continuer dans cette voie en me consacrant à la résolution de problèmes liés à l'irrigation ou aux transferts de matières polluantes issues de l'agriculture (nitrates, pesticides).

Bibliographie

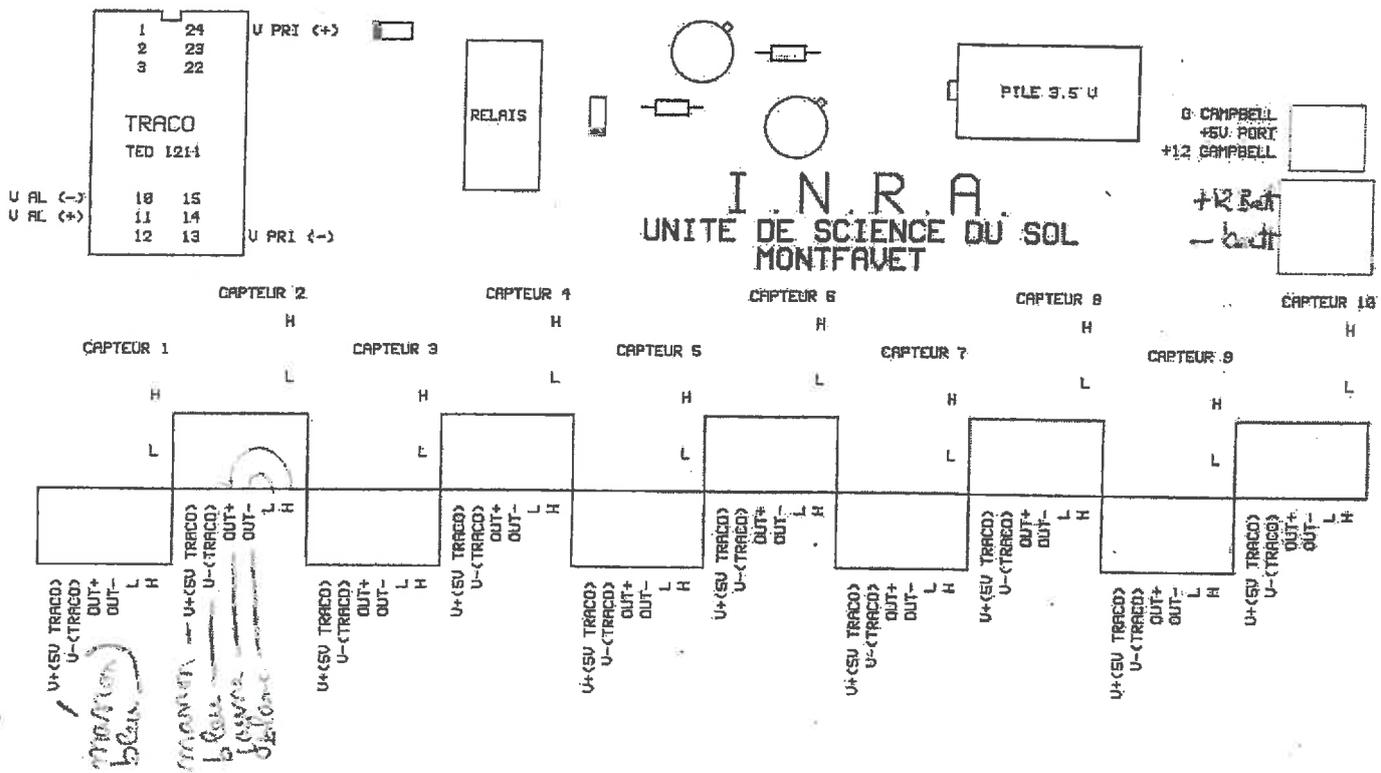
- Ankeny M.D., Ahmed M., Kaspar T.C., Horton R., 1991 – Simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 467-470.
- Bui E. N., Box E., 1992 - Stemflow, rain throughfall and erosion under canopies of corn sorghum. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 242-247.
- Cattan P., Bussière F., Nouvellon A., 2003 – Rainfall partitioning in banana plantations increased the runoff risk on andisols. *J. Hydrol.* Soumis à publication.
- Cattan P., juillet 2004 – Variabilité spatiale et temporelle des flux de drainage en bananeraie sur andosol : rapport d'interprétation des données lysimétriques de la parcelle Espérance Haut Station Neufchâteau ; campagne 2001-2002.
- Coquet Y., Boucher A., Labat C., Vachier P. et Roger-Estrade J., 2000 - Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques-Aspects théoriques et pratiques. *Etude et gestion des sols*, 7, 1, 7-24.
- De Condappa D., 2000 – Illustration de la méthode « Beer-Kan » en vue de la caractérisation hydrodynamique d'un sol. *DEA Université Joseph Fourier-Grenoble I*, 49p.
- Gardner W.R., 1958 – Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application from a water table. *Soil. Sci.*, 85, 228-232.
- Hanverkamp R., Parlange J.Y., Cuence R., Ross P.J. et Steenhuis T.S., 1998 – Scaling of Richards equation and its application to watershed modelling. *In G. Sposito (Ed) Scale dependence and scale invariance hydrology*, Cambridge University Press (New York), 190-223.
- Nanzyo M., Shoji S., Dahlgren, 1993 – Volcanic ash soils genesis, properties and utilization. *Soil Sci.*, 21, 288p.
- Nouvelon A., 1999 - Redistribution de l'eau de pluie par le bananier : identification et quantification des principaux facteurs de variation (Stage de fin d'étude, ISTOM).
- Parkin T., Codling E. E., 1990 - Rainfall distribution under a corn canopy : implications for managing agrochemicals. *Agron. J.*, 82, 1166-1169.
- Reynolds W.D., Elrick D.E., 1991 – Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 633-639.
- Ruy S., 2001 - Mise en oeuvre de la méthode dite "BEER-KAN" pour la caractérisation hydrodynamique *in situ* des sols (document INRA).
- Sansoulet J., Cabidoche Y.M., Cattan P., Clermont-Dauphin C. et Desfontaines L., 2004 - Solute transfert in an andosol after application of KNO₃ under banana crop : from the aggregate to the field experiment. Oral communication. Rala Report n°214, Volcanic Soil Resources in Europe. Cost Action 622 Final Meeting, Iceland.
- SICA ASSOBAG, 1987. Banane : spécial technique. N° 45. SICA ASSOBAG, Basse-Terre France. 99p.
- Van Elewijck L., 1989 - Stemflow on maize : a stemflow equation and the influence of rainfall intensity on stemflow amount. *Soil technology*, 2, 41-48.
- Wooding R.A., 1968 – Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.*, 4, 1259-1273.
- Zammit C., 1999 – Analyse et evaluation des paramètres des caractéristiques hydrodynamiques des sols. Prédiction par un modèle analytique à base physique à partir de données texturales. *Thèse de doctorat de l'INPG – Université Joseph Fourier – Grenoble I*, 200p. + annexes.

Annexe 1

**Branchements du circuit électrique lors des étalonnages
Schéma d'une carte électronique**



ANNEXE 1 CIRCUIT-CAPTEURS DE PRESSION



Branchements multiplexeurs - cartes

Ca1		Multi 1	Couleur fil
Capteur 1	voie 1	H1	Bleu
		L1	Blanc
Capteur 2	voie 2	H1	
		L1	Jaune
Capteur 3	voie 3	H1	Vert
		L1	
Capteur 4	voie 4	H1	Orange
		L1	Violet
Capteur 5	voie 5	H1	Gris
		L1	Noir
Capteur 6	voie 1	H2	Bleu
		L2	Blanc
Capteur 7	voie 2	H2	
		L2	Jaune
Capteur 8	voie 3	H2	Vert
		L2	
Capteur 9	voie 4	H2	Orange
		L2	Violet
Capteur 10	voie 5	H2	Gris
		L2	Noir

Ca3		Multi 1	Couleur fil
Capteur 21	voie 11	H1	Bleu
		L1	Blanc
Capteur 22	voie 12	H1	
		L1	Jaune
Capteur 23	voie 13	H1	Vert
		L1	
Capteur 24	voie 14	H1	Orange
		L1	Violet
Capteur 25	voie 15	H1	Gris
		L1	Noir
Capteur 26	voie 11	H2	Bleu
		L2	Blanc
Capteur 27	voie 12	H2	
		L2	Jaune
Capteur 28	voie 13	H2	Vert
		L2	
Capteur 29	voie 14	H2	Orange
		L2	Violet
Capteur 30	voie 15	H2	Gris
		L2	Noir

Ca2		Multi 1	Couleur fil
Capteur 11	voie 6	H1	Bleu
		L1	Blanc
Capteur 12	voie 7	H1	
		L1	Jaune
Capteur 13	voie 8	H1	Vert
		L1	
Capteur 14	voie 9	H1	Orange
		L1	Violet
Capteur 15	voie 10	H1	Gris
		L1	Noir
Capteur 16	voie 6	H2	Bleu
		L2	Blanc
Capteur 17	voie 7	H2	
		L2	Jaune
Capteur 18	voie 8	H2	Vert
		L2	
Capteur 19	voie 9	H2	Orange
		L2	Violet
Capteur 20	voie 10	H2	Gris
		L2	Noir

Ca4		Multi 2	Couleur fil
Capteur 31	voie 1	H1	Bleu
		L1	Blanc
Capteur 32	voie 2	H2	
		L2	Jaune
Capteur 33	voie 3	H3	Vert
		L3	
Capteur 34	voie 4	H4	Orange
		L4	Violet
Capteur 35	voie 5	H5	Gris
		L5	Noir
Capteur 36	voie 6	H6	Bleu
		L6	Blanc
Capteur 37	voie 7	H7	
		L7	Jaune
Capteur 38	voie 8	H8	Vert
		L8	
Capteur 39	voie 9	H9	Orange
		L9	Violet
Capteur 40	voie 10	H10	Gris
		L10	Noir

Branchements capteurs - cartes

Anciens capteurs

Ca	Capteur
OUT+	Rouge
OUT-	Bleu ou noir
L	Jaune ou orange
H	Blanc ou marron

Nouveaux capteurs

Ca	Capteur
OUT+	Rouge
OUT-	Bleu
L	Jaune
H	Blanc

Ca : centrale d'acquisition
 Multi 1 : multiplexeur 2 voies *16
 Multi 2 : multiplexeur 1 voie *32
 Ca1 : carte 1
 Ca2 : carte 2
 Ca3 : carte 3
 Ca4 : carte 4

Branchements centrale d'acquisition

Attention : ne pas oublier de brancher la centrale à la terre.
Alimentation générale de la centrale : 12V

Envoi des impulsions de commande de la
CA vers les multiplexeurs

CA	Multi	Couleur fil
C1	Res	Blanc
C2	Clck	Noir
C3	Res	Blanc
C4	Clck	Noir

Scrutations voie par voie

CA		Multi 1	
Voie 1	H	H1	COM
	L	L1	
	G	Shield	

CA		Multi 1	
Voie 2	H	H2	COM
	L	L2	
	G	Shield	

CA		Multi 2	
Voie 3	H	H	COM
	L	L	
	G		

Connexions 12V + impulsions relais

CA	Ca1	
G	- (12V)	Bleu
C5	"milieu"	Blanc
12V	+ (12V)	Rouge
CA	Ca2	
G	- (12V)	Bleu
C6	"milieu"	Blanc
12V	+ (12V)	Rouge
CA	Ca3	
G	- (12V)	Bleu
C7	"milieu"	Blanc
12V	+ (12V)	Rouge
CA	Ca4	
G	- (12V)	Bleu
C8	"milieu"	Blanc
12V	+ (12V)	Rouge

Température de référence	
CA	Tref
7 (H)	Rouge
AG	Blanc
E1	Noir

Thermocouples		
CA		TC1
Voie 5	H	Jaune
	L	Bleu
CA		TC2
Voie 6	H	Jaune
	L	Bleu

CA : centrale d'acquisition
Multi 1 : multiplexeur 2 voies *16
Multi 2 : multiplexeur 1 voie *32
Ca1 : carte 1
Ca2 : carte 2
Ca3 : carte 3
Ca4 : carte 4

Annexe 2

Résultats d'étalonnage des capteurs tensiométriques et de pression

	résidus (m)		coefficients			
			a3	a2	a1	b
capteur 1	Min	-0,0132	0,00037453	0,00011358	0,04563138	0,03623036
	Q10	-0,0020				
	Q25	-0,0018				
	Q50	-0,0003				
	Q75	0,0020				
	Q90	0,0022				
	Max	0,0075				
	Moy	0,0000				
	EC	0,0021				
capteur 2	Min	-0,00556682	0,00061222	0,00010835	0,04424832	0,0357752
	Q10	-0,00161777				
	Q25	-0,00087637				
	Q50	-0,00022189				
	Q75	0,00081038				
	Q90	0,00280868				
	Max	0,00468474				
	Moy	0,000000				
	EC	0,00158167				
capteur 3	Min	-0,0125	0,00065638	9,4168E-05	0,03913385	0,03189501
	Q10	-0,0024				
	Q25	-0,0015				
	Q50	-0,0001				
	Q75	0,0013				
	Q90	0,0022				
	Max	0,0084				
	Moy	0,0000				
	EC	0,00185777				
capteur 4	Min	-0,00675527	0,00081535	0,00010165	0,03916133	-0,14400146
	Q10	-0,00209732				
	Q25	-0,00093072				
	Q50	0,00039283				
	Q75	0,00139253				
	Q90	0,00181434				
	Max	0,00475278				
	Moy	0				
	EC	0,00165635				
capteur 5	Min	-0,0124	0,00061549	9,9248E-05	0,04039479	0,0278379
	Q10	-0,0029				
	Q25	-0,0012				
	Q50	-0,0003				
	Q75	0,0017				
	Q90	0,0024				
	Max	0,0076				
	Moy	0,0000				
	EC	0,00199503				
capteur 6	Min	-0,01207682	0,00070165	0,00010786	0,04556261	0,04772668
	Q10	-0,00244961				
	Q25	-0,00154267				
	Q50	-0,00011428				
	Q75	0,0014598				
	Q90	0,00236831				
	Max	0,00723896				
	Moy	-3,5196E-16				
	EC	0,00193958				
capteur 7	Min	-0,0127	0,00010552	0,0450096	0,00052731	0,02365627
	Q10	-0,0020				
	Q25	-0,0017				
	Q50	0,0000				
	Q75	0,0014				
	Q90	0,0020				
	Max	0,0079				
	Moy	0,0000				
	EC	0,00194303				
capteur 8	Min	-0,01095979	0,00048597	0,00010633	0,04498616	0,02509412
	Q10	-0,00209404				
	Q25	-0,0015374				
	Q50	9,0567E-05				
	Q75	0,0012856				
	Q90	0,00203569				
	Max	0,00739771				
	Moy	-7,9411E-16				
	EC	0,00185412				

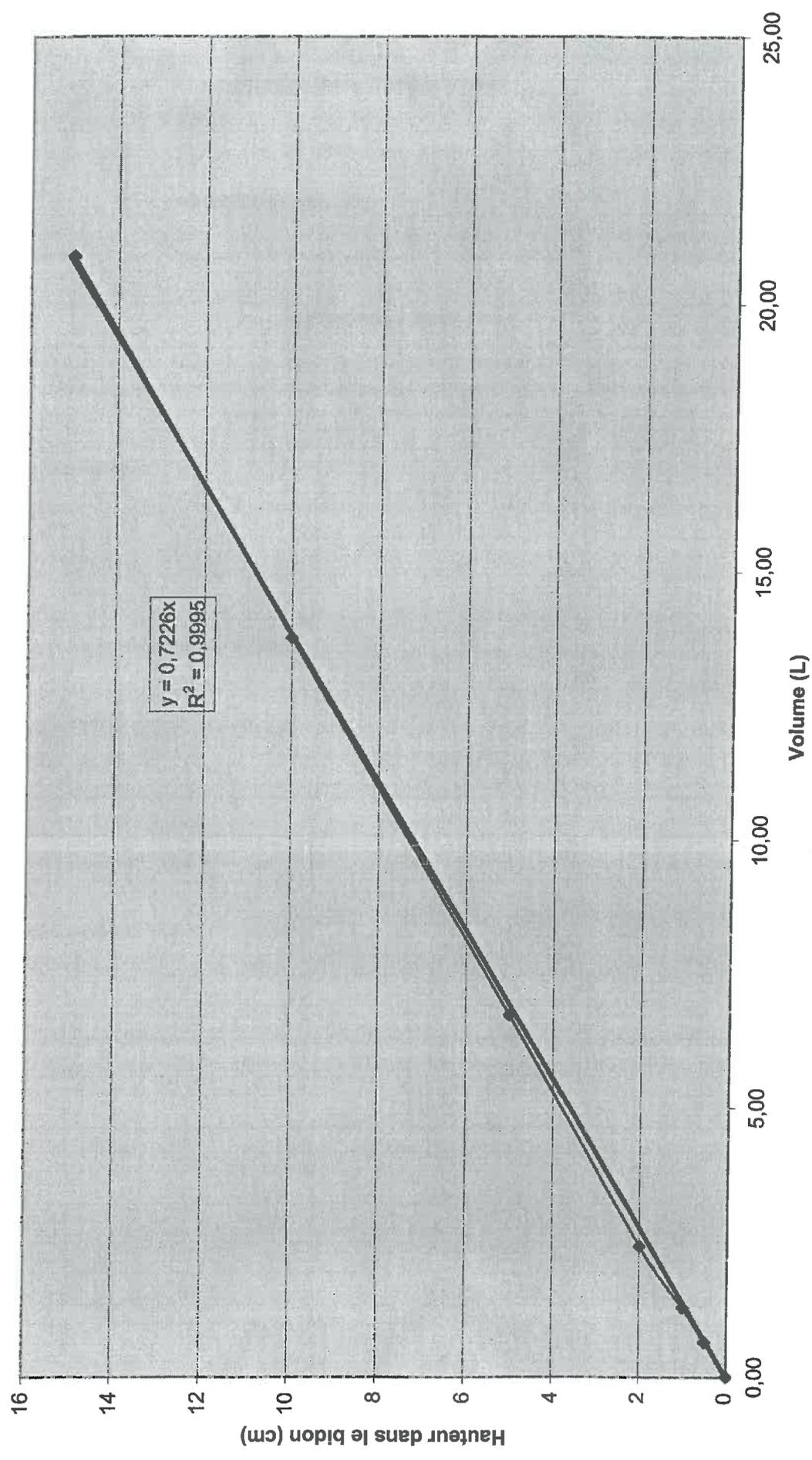
Annexe 3

Résultats d'étalonnage des bidons lysimétriques et du
bac de ruissellement

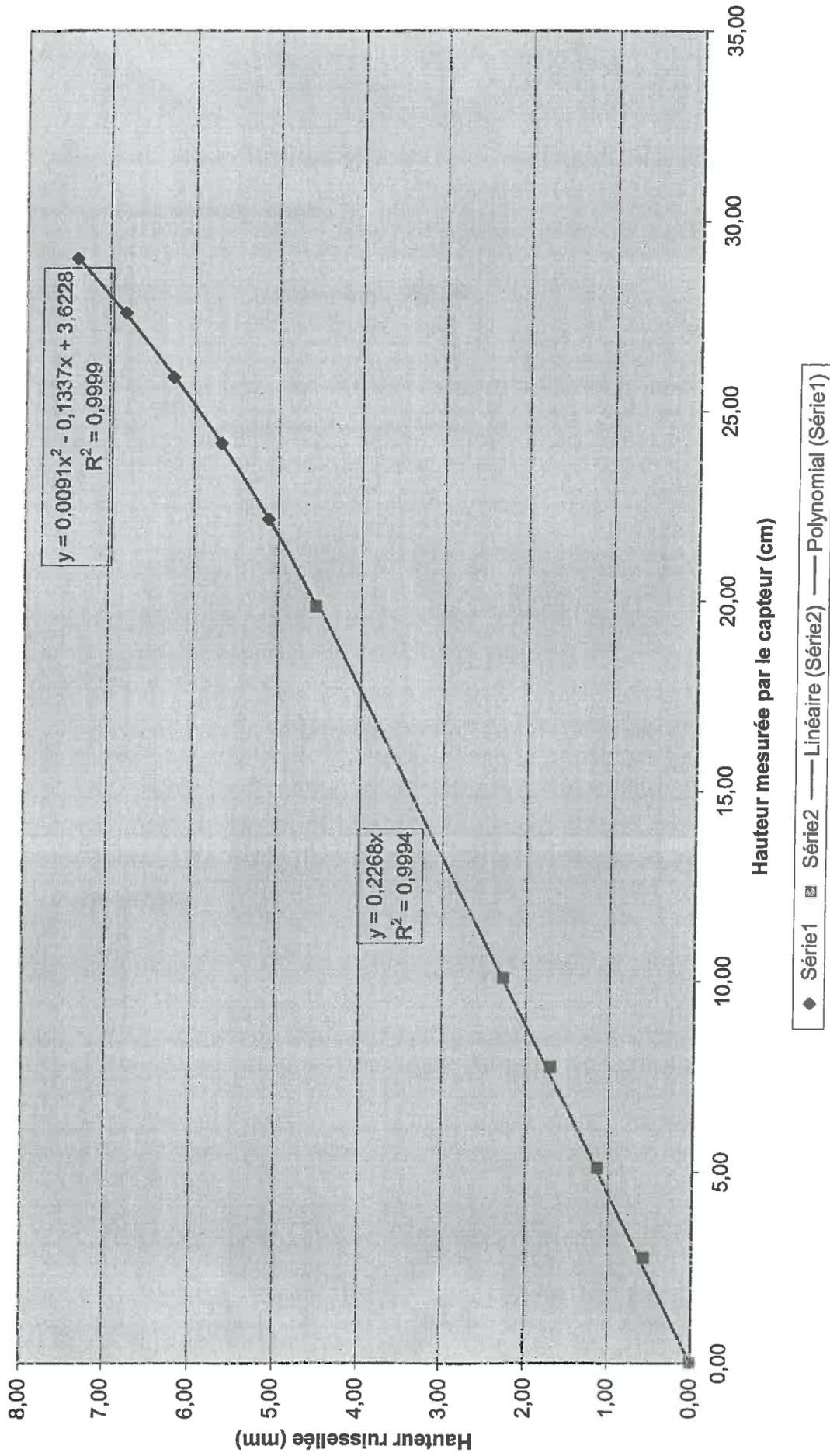
Données des étalonnages des bidons munis de capteurs de pression et du lavoir

Hauteur infiltrée (mm)	Volume versé (l)	Hauteur théorique (volume/surface) (cm)	Tension (mV)	Température(°C)	Hauteur mesurée (cm)	Hauteur corrigée (cm)
Lysi1						
0,00	0	0,00	0,87	25,11	8,78	0,00
2,47	0,5	0,76	0,94	26,05	9,17	0,38
4,94	1	1,51	1,158	26,129	10,23	1,45
9,88	2	3,03	1,41	26,04	11,45	2,67
24,69	5	7,57	2,283	26,36	15,71	6,93
49,38	10	15,15	3,79	26,8	23,07	14,29
98,77	20	30,29	6,781	26,42	37,59	28,81
148,15	30	45,44	9,601	26,36	51,30	42,51
Lysi2						
0,00	0	0,00	7,856	24,53	41,93	0,00
2,47	0,5	0,76	7,99	25,702	42,73	0,80
4,94	1	1,51	8,39	26,744	44,77	2,84
9,88	2	3,03	8,86	26,577	46,96	5,03
24,69	5	7,57	9,3332	26,41	49,16	7,23
49,38	10	15,15	10,81	26,74	56,18	14,25
98,77	20	30,29	13,832	27,243	70,53	28,60
123,46	25	37,87	15,376	27,077	77,78	35,85
Lysi3						
0,00	0	0,00	2,01	26,274	13,28	0,00
2,47	0,5	0,76	2,149	26,814	13,90	0,62
4,94	1	1,51	2,32	27,092	14,64	1,36
19,75	4	6,06	3,357	27,42	18,99	5,72
24,69	5	7,57	3,6932	27,54	20,41	7,13
49,38	10	15,15	5,3719	27,7	27,43	14,15
98,77	20	30,29	8,7963	27,79	41,74	28,46
148,15	30	45,44	12,288	27,618	56,29	43,01
Lysi4						
0,00	0	0,00	2,9	26,567	-0,09	0,00
2,47	0,5	0,76	3,0891	26,99	0,75	0,84
4,94	1	1,51	3,24	27,203	1,40	1,50
9,88	2	3,03	3,6261	27,438	3,05	3,14
27,16	5,5	8,33	4,767	27,248	7,81	7,90
51,85	10,5	15,90	6,5131	27,186	15,12	15,22
101,23	20,5	31,05	9,937	27,292	29,50	29,59
150,62	30,5	46,20	13,36	27,335	43,86	43,95
Stemflow						
	0	0,00	0,03358	25,084	6,69	0,00
	0,5	0,76	0,16792	25,05	7,34	0,65
	1	1,51	0,30225	25,027	7,99	1,29
	2	3,03	0,53734	25,083	9,13	2,43
	5	7,57	1,4273	25,08	13,42	6,73
	10	15,15	2,888	25,077	20,47	13,78
	15	22,72	4,3655	25,074	27,60	20,91
Ruissellement :						
hauteur ruisselée (mm)	Volume versé (L)	Hauteur théorique (volume/surface) (cm)	Tension (mV)	Température(°C)	Hauteur mesurée (cm)	Hauteur corrigée (cm)
0,00	0	0	5,5739	27,01	28,46	0,00
0,57	5	2,5	6,178	28,244	31,21	2,75
1,14	10	5	6,715	28,466	33,56	5,10
1,70	15	7,5	7,3193	28,729	36,21	7,75
2,27	20	10	7,8564	28,807	38,54	10,08
4,55	40	20	10,139	28,25	48,32	19,87
5,11	45		10,676	28,039	50,61	22,15
5,68	50		11,146	27,85	52,60	24,15
6,25	55		11,549	27,828	54,34	25,88
6,82	60		11,952	27,595	56,04	27,58
7,39	65		12,288	27,491	57,47	29,01

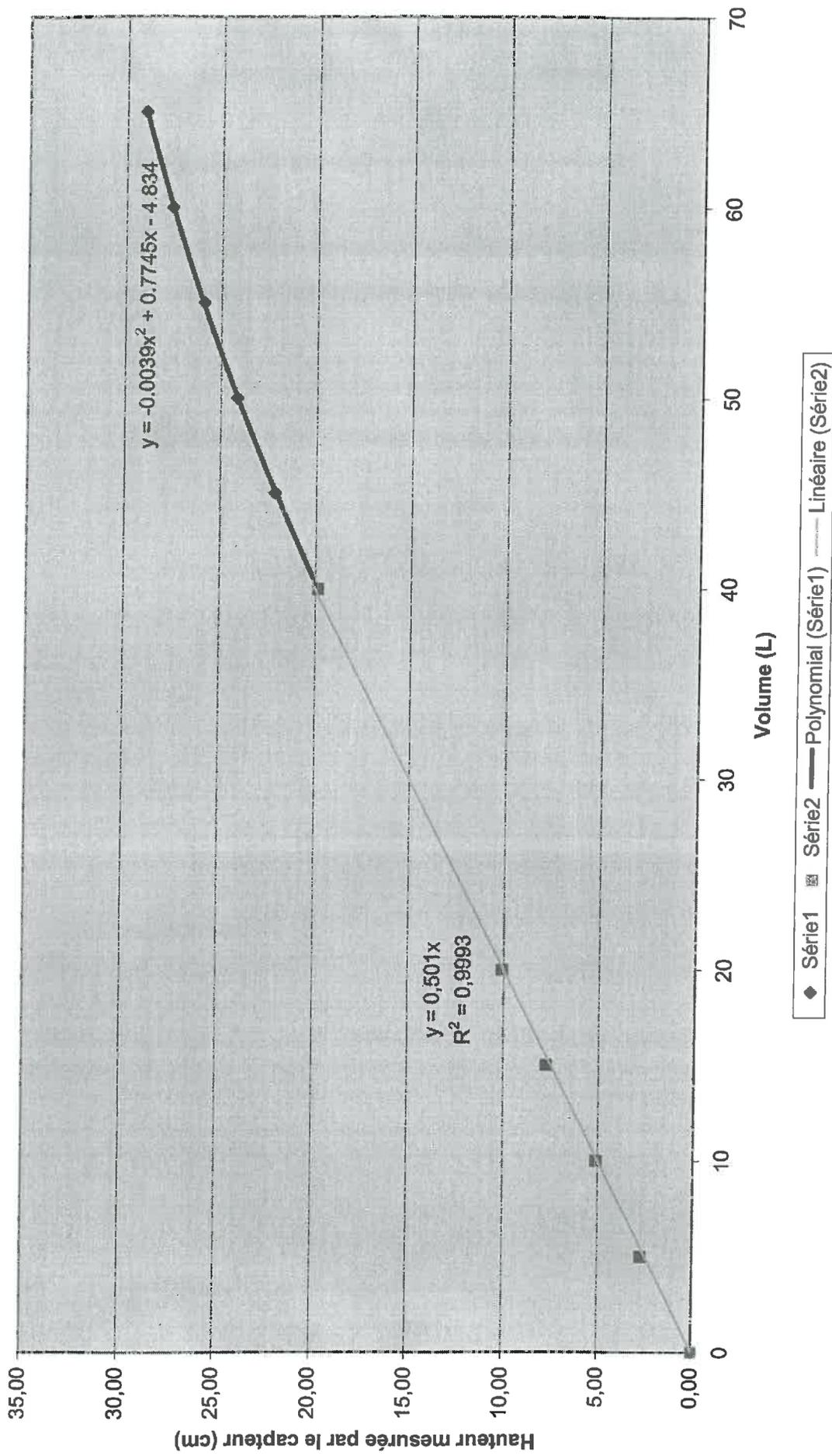
Volume de stemflow fonction de la hauteur mesurée par le capteur de pression



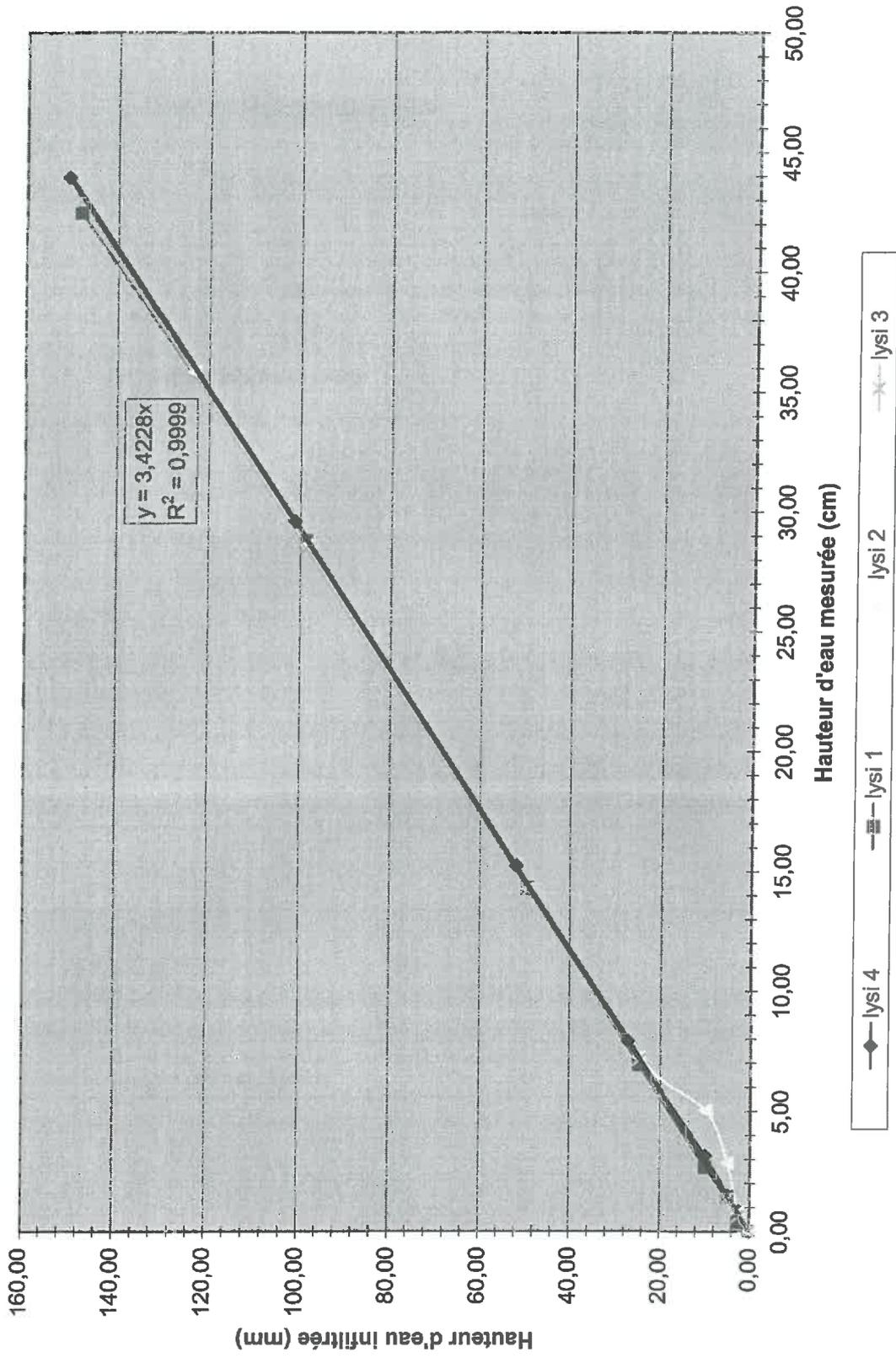
Hauteur ruisseléesur la placette fonction de la hauteur mesurée par le capteur



Hauteur mesurée fonction du volume versé dans le "lavoir"



Hauteur d'eau drainée en fonction de la hauteur mesurée par les capteurs de pression



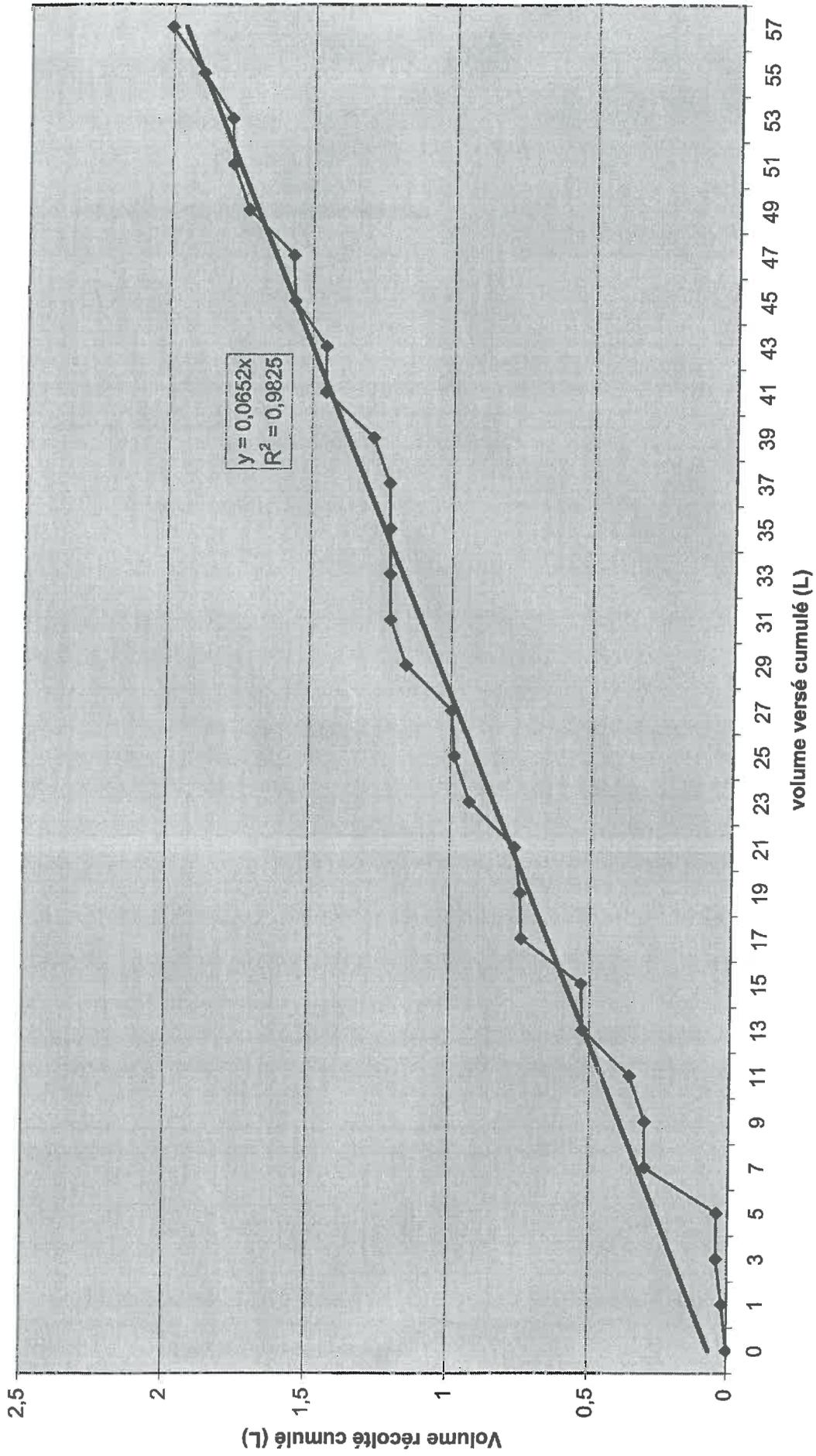
Annexe 4

Résultats d'étalonnage du partiteur de stemflow

Etalonnage du partiteur de stemflow

Volume versé (L)	Volume versé cumulé (L)	Durée (s)	Capt (mV)	PT100 (°C)	Hauteur (cm)	Volume récolté cumulé (L)
0	0		0,03358	25,35	0,11	0
1	1	9	0,03358	25,739	0,14	0,01812147
2	3	13	0,03358	26,207	0,17	0,03992313
2	5	49	0,03358	26,207	0,17	0,03992313
2	7	80	0,10072	27,167	0,57	0,2996966
2	9	13	0,10072	27,185	0,57	0,30054373
2	11	23	0,1175	27,23	0,65	0,35641612
2	13	45	0,1678	27,41	0,91	0,52610898
2	15	68	0,16784	27,518	0,92	0,53137162
2	17	13	0,2349	27,504	1,24	0,74566292
2	19	46	0,2349	27,586	1,25	0,74960047
2	21	11	0,2349	28,044	1,282	0,77159315
2	23	12	0,28529	28,044	1,527	0,93330917
2	25	13	0,30206	28,062	1,609	0,98800189
2	27	21	0,30208	28,261	1,624	0,99771709
2	29	20	0,35243	28,261	1,869	1,15938257
2	31	21	0,36921	28,287	1,952	1,21453374
2	33	03	0,36921	28,344	1,957	1,21732536
2	35	49	0,36921	28,39	1,960	1,21957824
2	37	05	0,36921	28,447	1,964	1,22236986
2	39		0,3859	28,546	2,053	1,28084117
2	41		0,43632	28,704	2,310	1,4506475
2	43	09	0,43631	28,702	2,310	1,45051645
2	45	07	0,46987	28,823	2,482	1,56439031
2	47	07	0,46987	28,925	2,490	1,56945899
2	49	20	0,52	28,86	2,729	1,72740197
2	51	20	0,53699	28,901	2,815	1,78408355
2	53	20	0,53699	29,004	2,822	1,78925117
2	55	53	0,57	28,94	2,978	1,89218953
2	57	55	0,60411	28,982	3,148	2,00400334

Volume récolté cumulé fonction du volume versé cumulé



Annexe 5

Interventions techniques sur la placette

Dates	Heures	Descriptions de l'intervention
04/06/04		Relevé de la micro topographie
08/06/04		Installation des tensiomètres
14/06/04	14h30-15h30	Étalonnage du bidon lysimétrique 1
15/06/04		Installation de mât du pluviomètre
15/06/04	16h00-16h30	Étalonnage du bidon lysimétrique 2
18/06/04	14h50-16h30	Étalonnages du bidon lysimétrique 3 et 4
23/06/04		Remplissage des cannes tensiométriques
25/06/04	14h30-16h00	Étalonnage du lavoir
25/06/04		Début des acquisitions, sans interception du stemflow
12/07/04		Relevé des positions des cannes tensiométriques
24/07/04	A partir de 16h10	Disfonctionnement des PT100 et des détecteurs de niveau (multiplexeur 2)
26/07/04		La bougie poreuse de la canne tensiométrique 2 est cassée
27/07/04	14h00-16h00	Mesures d'infiltrations sur la placette (DECAGON)
27/07/04	13h10	Installation du capteur et de la PT100 6
30/07/04		Installation de la collerette d'interception du stemflow. Début des acquisitions avec interception complète du stemflow
03/08/04		Réparation du multiplexeur 2
05/08/04		Installation du partiteur de stemflow. Début des acquisitions avec interception partielle du stemflow
06/08/04		Changement de la canne tensiométrique 2
06/08/04	14h00-16h00	Mesures d'infiltrations sur la placette (DECAGON)
11/08/04	14h00-16h00	Mesures d'infiltrations sur la placette (DECAGON)
12/08/04	14h00-16h00	Mesures d'infiltrations sur la placette (DECAGON)
15/08/04		Le pluviomètre ne fonctionne pas
18/08/04	09h30	Vérification capteur 6 et nettoyage pluviomètre
19/08/04	14h00-16h00	Mesures d'infiltrations sur la placette (DECAGON)
23/08/04	8h30-12h30	Étalonnage du partiteur de stemflow
25/08/04	14h00-16h00	Mesures d'infiltrations sur la placette (DECAGON)
26/08/04		Le pluviomètre ne fonctionne pas
27/08/04	16h00-16h30	Nettoyage du pluviomètre
15/09/04- 16/09/04		Entretien bac de ruissellement – changement de la collerette

Dates et heures des vidanges du bac de ruissellement et des bidons lysimétriques :

Dates	Heures
02/07/04	9h50
07/07/04	9h35
12/07/04	10h30
16/07/04	8h30
23/07/04	13h45
28/07/04	9h50
29/07/04	10h30
09/08/04	10h00
13/08/04	16h30
16/08/04	11h45
27/08/04	17h00
31/08/04	
06/09/04	
15/09/04	9h30

Annexe 6

Conductivités hydrauliques à saturation obtenues lors de la comparaison Beer-Kan /Decagon

Hors placette		Ks (mm/h)			
		Beer-Kan	Décagons (régression linéaire)		
Prof (cm)	EDS		essai 1	essai 2	essai 3
0	1	582	940	1943	1535
		127	577	185	183
	2	270	579	426	736
		334	1263	734	-
	3	22	191	279	461
		27	288	162	284
	4	710	663	763	561
		487	155	199	639
30	Fosse	254	-	-	-
		845	-	-	-
		280	-	-	-

- 1 : zone d'accumulation
- 2 : chemin d'eau
- 3 : croûte + mousse
- 4 : zone travaillée (pied de bananier)

Juin-juillet 2004 Mai 2004

Annexe 7

Bilan des volumes drainés et ruisselés pour quelques événements pluvieux

Date	Heure	Pluie (mm)	Intensité max (mm/h)	Hauteurs précipitées dernières 24h	Hauteurs mesurées (cm)						Hauteurs infiltrées (mm)				Hauteurs ruisselées (mm)		pourcentage ruisselé %	Volume Stemflow (L)		Volume Pluie (L)	Coefficient de stemflow
					Lysi 1	Lysi 2	Lysi 3	Lysi 4	Lavoir	Stemflow	Lysi 1	Lysi 2	Lysi 3	Lysi 4	Lavoir	bidon (7% du stemflow)		total	total		
02/07/2004	20h56-21h10	4,4	48	7,6	avant événement pluvieux	0,27	0,6	0	0,01	1											
					après événement pluvieux	0,57	0,87	0	0,18	3	1,03	0,92	0,00	0,58	0,49	11,18					
03/07/2004	03h57-04h09	6,4	48	9,6	avant événement pluvieux					3,04											
					après événement pluvieux					11,34	0,00	0,00	0,00	1,91	29,91						
11/07/2004	01h25-02h30	6,4	48	9,2	avant événement pluvieux					1,1											
					après événement pluvieux					3,08	0,00	0,00	0,00	0,49	7,61						
11/07/2004	07h00-09h35	23,2	96	8,4	avant événement pluvieux					3,08											
					après événement pluvieux					30,47	0,00	0,00	0,00	7,33	31,60						
16/07/2004		91,6	108		avant événement pluvieux	4,8	4,07	0,9	2,17	5,83											
					après événement pluvieux	30,54	43,22	6,37	16,5	53,64	88,11	134,01	18,72	45,63	21,38	23,31					
02/08/2004 sans Stemflow	02h02-02h16	6,2	48	0,6	avant événement pluvieux	9,62	9,733	3,18	7,59	4,28											
					après événement pluvieux	10,04	9,803	3,42	7,72	6,8	1,44	0,24	0,82	0,44	0,60	9,67					
02/08/2004 sans Stemflow	04h31-04h35	3,4	96	6,8	avant événement pluvieux					6,8											
					après événement pluvieux					9,74	0,00	0,00	0,00	0,69	20,19						
02/08/2004 sans Stemflow	04h55-05h21	10,2	96	10,2	avant événement pluvieux					9,74											
					après événement pluvieux					22,95	0,00	0,00	0,00	3,15	30,87						
02/08/2004 sans Stemflow	09h38-10h10	10,8	80	21,2	avant événement pluvieux	10,47			7,731	22,95											
					après événement pluvieux	10,635			7,861	31,486	0,56	0,00	0,00	0,44	3,09	28,59					
02/08/2004 sans Stemflow	02h02-10h10	30,6	96	0,6	avant événement pluvieux	9,62			7,59	4,28											
					après événement pluvieux	10,635			7,861	31,486	3,47	0,00	0,00	0,93	7,49	24,48					
15/08/2004 partiteur	10h13-10h51	4,4	60	7,2	avant événement pluvieux					11,89	8,7										
					après événement pluvieux					13	8,97	0,00	0,00	0,00	0,26	5,80	0,18	2,55	0,20	12,79	
15/08/2004 partiteur	15h15-17h13	36,4	96	11,8	avant événement pluvieux					13,06	8,87										
					après événement pluvieux					49,41	11,37	0,00	0,00	0,00	16,27	42,37	1,65	23,58	1,74	13,57	
15/08/2004 partiteur	16/08/04 01h17-16/08/04 05h05	48	96	6,8	avant événement pluvieux	2,254	3,8	0,45	0,92	11,83	8,28										
					après événement pluvieux	13,56	21,28	2,43	7,35	49,41	11,4	36,70	89,83	6,78	22,01	16,55	33,78	2,06	29,43	2,22	13,27
27/08/04 partiteur	27/08/04 22h27-28/08/04 00h34	52,2	108	37,2	avant événement pluvieux					3,55	6,67										
					après événement pluvieux					58,56	8,59	0,00	0,00	0,00	26,22	50,24	1,27	18,11	2,36	7,67	
28/08/04 partiteur	01h27-1h39	4,4	48	77,4	avant événement pluvieux					58,28	8,59										
					après événement pluvieux					59,41	8,9	0,00	0,00	0,00	1,06	24,07	0,20	2,92	0,20	14,69	
27/08/04 partiteur	27/08/04 22h00-28/08/04 19h06	57,6	108	37,2	avant événement pluvieux	0,98	0,96	0,45	0,17	3,55	6,67										
					après événement pluvieux	15,34	18,37	0,92	1,49	59,42	8,9	49,15	59,53	1,61	4,52	27,03	46,93	1,47	21,03	2,61	8,07

Résumé

La profession bananière guadeloupéenne est actuellement confrontée à divers problèmes tels que la faible productivité, la concurrence et la pression de plus en plus sensible des consommateurs et des pouvoirs publics pour une production plus respectueuse de l'environnement. La pratique de systèmes de cultures basés sur des apports massifs d'intrants ne permet plus à la culture bananière guadeloupéenne de s'inscrire dans une perspective de durabilité. Au niveau du sol, sous bananeraie, les précipitations subissent une redistribution spatiale par le couvert végétal entraînant une forte hétérogénéité des lames d'eau incidentes. Ces flux d'eau localement très intenses sont responsables d'un fort ruissellement et d'une érosion localement marquée, qui induisent un risque de pollution par entraînement des apports en fertilisants et produits phytosanitaires. L'objet du stage était d'évaluer à l'échelle d'un bananier cultivé sur andosol de Guadeloupe l'influence de la redistribution de l'eau de pluie par le couvert végétal et de l'hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques de surface sur le ruissellement, l'infiltration et le drainage, au moyen d'une analyse dynamique des flux et d'une caractérisation du sol. Pour cela, un dispositif expérimental centré autour d'un bananier a été mis en place. Les résultats ont permis d'établir des hypothèses de fonctionnement des processus hydriques d'infiltration et de ruissellement en relation avec les états de surface, les paramètres hydrodynamiques du sol et les flux incidents redistribués par le couvert végétal. Le stemflow, eau de pluie redirigée par les feuilles vers le faux-tronc, semble s'infiltrer au pied du bananier et développe, sous l'effet de la pente de la placette et de la discontinuité des propriétés hydrodynamiques entre les horizons A et B, une composante horizontale du transfert orientée vers l'aval du bananier, dans le sens de la pente. Des hypothèses concernant l'origine du ruissellement sous bananeraie ont pu être formulés au vu des résultats expérimentaux. A la suite de ce stage, un modèle 3D permettant de simuler à l'échelle d'un bananier cultivé sur andosol de Guadeloupe le fonctionnement hydrique complexe du système sol-bananier sera réalisé.