



HAL
open science

Caractérisation hydrodynamique des échantillons de sol issus de parcelles distinctes par le type de travail du sol et de fumure

A. Aboudrare

► **To cite this version:**

A. Aboudrare. Caractérisation hydrodynamique des échantillons de sol issus de parcelles distinctes par le type de travail du sol et de fumure. [Stage] Département du Machinisme Agricole. Ecole Nationale d'Agriculture de Meknes (ENA), Meknès, MAR. 2003, 48 p. hal-02832836

HAL Id: hal-02832836

<https://hal.inrae.fr/hal-02832836>

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès
Département de Machinisme Agricole
Centre d'Expérimentation et d'Application
du Matériel Agricole

Institut National de la Recherche
Agronomique
Centre de Recherches d'Avignon
Unité Climat Sol Environnement
Laboratoire sol

Rapport

Effectué dans le cadre d'un séjour Post-Doctoral
à l'INRA-Avignon, Unité CSE, Laboratoire Sol

du 09 Décembre 2002 au 03 Mars 2003

Caractérisation hydrodynamique des
échantillons de sol issus de parcelles
distinctes par le type de travail du sol et
de fumure

Abdellah ABOUDRARE

Encadrement : Stéphane RUY

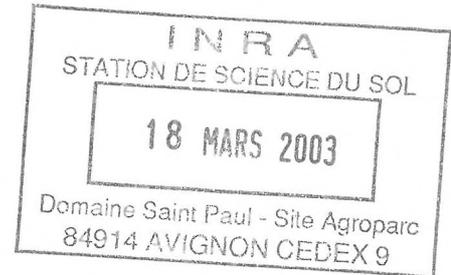
Mars 2003

TH - GB 18

Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès
Département de Machinisme Agricole
Centre d'Expérimentation et d'Application
du Matériel Agricole

Institut National de la Recherche
Agronomique
Centre de Recherches d'Avignon
Unité Climat Sol Environnement
Laboratoire sol

Rapport



Effectué dans le cadre d'un séjour Post-Doctoral
à l'INRA-Avignon, Unité CSE, Laboratoire Sol

du 09 Décembre 2002 au 03 Mars 2003

Caractérisation hydrodynamique des
échantillons de sol issus de parcelles
distinctes par le type de travail du sol et
de fumure

Abdellah ABOUDRARE

Encadrement : Stéphane RUY

Mars 2003

Sommaire

Objectifs du séjour	1
1- Cadre du séjour	1
2- Objectifs du séjour	1
Matériels et Méthodes	2
I- Mesure de Ksat	2
I-1- Principe de la méthode	2
II-2- Procédures	3
II- Méthode des ondes cinématiques	4
II-1- Théorie des ondes Cinématiques	4
II-2- Dispositif expérimental	4
II-3- Protocole expérimental	4
III- Méthode DRIP	5
III-1- Dispositif expérimental	5
III-2- Protocole expérimental	6
IV- Méthode Wind	6
IV-1- Modèles	6
IV-2- Principe de l'algorithme de Wind	7
IV-3- Dispositif expérimental	8
IV-4- Protocole expérimental	9
Résultats préliminaires	10
I- Conductivité hydraulique à saturation, densité apparente et macroporosité	10
II- Résultats des expériences des ondes cinématiques	11
III- Résultats des expériences DRIP	18
IV- Résultats des expériences Wind et comparaison des méthodes de mesure	19
Suynthèse et conclusion	23
Perspectives	23
Références bibliographiques	24
Annexes	25

Remerciements

Au terme de ce travail je tiens à remercier Mr. André Chanzy, Directeur de Recherche à l'INRA et Directeur de l'Unité Climat, Sol et Environnement, de m'avoir permis de passer ce séjour au sein de son unité.

Je remercie également Mr. Stéphane Ruy, Chargé de Recherches à l'unité CSE pour son encadrement très efficace et pour m'avoir permis d'acquérir beaucoup de connaissances dans le domaine de physique du sol. Je le remercie également de m'avoir accueilli dans de bonnes conditions et d'avoir fait tout le nécessaire pour rendre mon séjour agréable.

Je tiens à remercier MM. Dominique Renard et Pierre Perrain, Techniciens à l'Unité CSE, pour leurs aide efficace pour la mise en place des dispositifs de mesure Wind et Ondes Cinématiques

Je remercie également Chantal Gars, Secrétaire du Laboratoire Sol, pour son aide administrative tout au long de mon séjour.

Je remercie également tous les organismes qui ont contribué au financement de mon séjour, en particulier, l'Unité CSE (INRA-Avignon), le Département Environnement et Agronomie (INRA) et la région PACA.

Je remercie aussi toute l'équipe du Laboratoire sol qui ont rendu mon séjour agréable. En fait je pourrai tous les citer, mais la liste est longue.

Je tiens à remercier Monsieur le Directeur de l'Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès, Pr. Abdelhafid Debbah, qui a bien voulu m'autoriser à effectuer ce séjour post-doctoral. Je remercie également Mr. Hassan Chekli, Professeur et Chef de Département de Machinisme Agricole à l'ENA de Meknès pour son aide précieuse au moment de l'élaboration du dossier de candidature pour ce séjour.

OBJECTIFS DU SEJOUR

1- Cadre de séjour

Mon séjour à l'INRA d'Avignon s'inscrit dans le cadre d'un projet existant actuellement entre le CIRAD et l'INRA et qui concerne l'évaluation environnementale et agronomique du semis direct et plus généralement des techniques simplifiées de travail du sol. Dans ce projet, il est souhaitable d'approfondir les connaissances sur l'évolution des propriétés physiques et les pools de matière organiques dans l'horizon de surface, anciennement labouré, à court et à moyen terme. Il est également souhaitable d'acquérir des références sur plusieurs types de milieu : l'un est caractéristique des milieux tropicaux (Brésil), l'autre des climats tempérés (nord de la France, Bretagne,). Un troisième site concernera le climat méditerranéen. Les principaux objectifs scientifiques de ce projet sont les suivants :

- Caractériser l'évolution de la structure du sol, et comprendre les déterminants de cette évolution (devenir des résidus de culture, macro-faune, matière organique, cycles gel, humectation-dessiccation).
- Caractériser l'impact de l'évolution de la structure du sol sur l'évolution de l'infiltration et des propriétés hydrodynamiques.
- Caractérisation de l'influence du mulch formé avec les résidus de culture sur les flux hydriques à l'interface sol-atmosphère.
- Caractériser le devenir des résidus de culture et des racines. Identifier les différents pools de matière organique et leur dynamique.
- Quantifier la quantité d'azote provenant de la dégradation des résidus de culture et de la matière organique et leur dynamique.
- Analyser les conséquences en matière de séquestration du carbone dans différents pools de matière organiques du sol.

Mon travail durant le séjour post-doctoral concernera les aspects hydrodynamiques du projet.

2- Objectifs du séjour

L'objectif initial de mon séjour post-doctoral à l'INRA d'Avignon est d'évaluer l'impact de l'évolution de la structure du sol sur l'infiltration et les propriétés de transferts hydriques. Plus spécifiquement, je serai amené à prendre en charge une intercomparaison de différentes méthodes de caractérisation hydrodynamiques de laboratoire (méthode de Wind, Tamari et al., 1993 ; méthode des ondes cinématiques en cours de développement, Rousseau, 2000 ; méthode DRIP, Stolte et al., 1994) sur des échantillons prélevés sur les sites français identifiés dans le projet initial. Il était également prévu de caractériser la structure du sol sur les mêmes échantillons en quantifiant leur porosité (méthode d'imprégnation à la résine) en souhaitant trouver un lien entre les propriétés hydrodynamiques du sol et les paramètres de structure. En raison de la durée du séjour, relativement courte, seule la caractérisation hydrodynamique par les méthodes de laboratoire citées plus haut a été réalisée.

Les échantillons à traiter portent sur des traitements de travail du sol (labour, semis direct, travail superficiel) et de fumure (fumure minérale, fumier de volaille) prélevés, en deux répétitions, sur un site français de Bretagne (Rennes) au printemps 2002. Mais, jusqu'à la fin du séjour (07/03/2003), seuls les échantillons en labour et semis direct (avec fumure minérale et organique de volaille) ont été traités.

MATERIELS ET METHODES

Pour un même échantillon du sol, les caractéristiques hydrodynamiques ont été mesurées à l'aide des méthodes suivantes :

- Dispositif Ksat (perméamètre à charge constante) pour la mesure de Ksat.
- Méthode des Ondes Cinématiques (KDW) pour la détermination de la relation $q(\theta_{ma})$ et la simulation de l'hydrogramme de drainage dans le domaine proche de la saturation ($\theta_{cc} < \theta < \theta_{sat}$).
- Méthode dite " Régime Permanent " ou " DRIP " permettant de déterminer la relation $K(h)$ dans un domaine de potentiel matriciel compris entre -20 et -1 cm.
- Méthode Wind en évaporation et en infiltration permettant de déterminer les relations $h(\theta)$, $K(\theta)$ et $K(h)$ pour des domaines de potentiels matriciels plus secs ($-800 < h < -50$ cm).

Les échantillons à traiter proviennent de parcelles distinctes par le type de travail du sol (labour, semis direct, travail superficiel) et de fumure (fumure minérale, fumier de volaille). Ils ont été prélevés, en deux répétitions, sur un site français de Bretagne (Rennes) au printemps 2002 (les dates de prélèvement des deux répétitions ne sont pas les mêmes : environ 6 mois entre les deux prélèvements). Le tableau 1 résume l'ensemble des échantillons retenus.

Tableau 1: Echantillons du sol à traiter

Fumure	Travail du sol		
	Labour	Semis direct	Travail superficiel
Engrais minéral	LM1	S1M1	S2M1
	LM2	S1M2	S2M2
Fumier de volaille	LFV1	S1FV1	S2FV1
	LFV2	S1FV2	S2FV2

*L : Labour ; S1 : Semis direct ; S2 : Travail superficiel ;
M : engrais minéral ; FV : Fumier de volaille*

Jusqu'à la fin de mon séjour, seuls les échantillons LM1, LFV1, S1M1, S1FV1, LFV2 et S1FV2 ont pu être traités. L'échantillon S1M2 a été annulé car il était très perturbé (problème lors de prélèvement ou de transport).

I- Mesure de Ksat

I-1- Principe de la méthode

Ksat est déterminé en utilisant la méthode de la charge constante basée sur la loi de Darcy. Pour cela on dispose d'un perméamètre à charge constante alimenté par l'eau déminéralisée à travers une pompe péristaltique (annexe 1). Un niveau d'eau est maintenu constant au dessus d l'échantillon de sol à l'aide d'un réservoir placé latéralement et alimenté par la pompe. La circulation de l'eau dans l'échantillon se fait *per ascensum*.

Le volume d'eau qui coule à travers l'échantillon est mesuré en fonction du temps. L'écoulement de cette eau doit être de type laminaire. L'eau circule de bas en haut afin de limiter le déplacement des particules constituant le sol, en particulier les plus fines.

I-2- Procédures

a- Saturation de l'échantillon.

L'échantillon est posé dans un bac de saturation à une succion de -10 cm pendant 72 heures. La saturation se fait par succion.

b- Mesures

Un bec verseur, placé au niveau de la partie supérieure de l'échantillon, a pour fonction d'éliminer l'eau ayant percolée *per ascensum*. Cette eau est dirigée vers un bêcher placé sur une balance.

La mesure du volume d'eau percolée ne débute qu'une demi-heure après avoir imposé la charge choisie (temps nécessaire à la mise en équilibre du système).

Le débit d'écoulement doit être régulier mais pas trop élevé de façon à conserver un flux laminaire.

Le volume écoulé est mesuré toutes les minutes, pour chaque charge, pendant 5 minutes. On répète les mesures sous 5 ou 6 charges différentes. L'allure de la courbe (V/t) obtenue permet d'apprécier la qualité de la mesure à chaque valeur de charge.

c- Calcul

Ainsi on peut alors calculer K_{sat} par la loi de Darcy qui établit la proportionnalité du débit avec la perte de charge unitaire $\Delta H/H$ de l'écoulement :

$$Q = V/t = S.K_{sat} \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad \text{soit} \quad K_{sat} = \frac{V}{S.t} \times \frac{L}{\Delta H}$$

- où
- K_{sat} : conductivité hydraulique à saturation ($m \ s^{-1}$)
 - V : volume d'eau percolée à travers l'échantillon pendant le temps t (m^3)
 - S : surface de l'échantillon du sol (m^2)
 - t : temps durant lequel la mesure est effectuée (s)
 - L : hauteur de l'échantillon du sol (m)
 - ΔH : hauteur de la charge d'eau imposée (m)

K_{sat} dépend des caractéristiques du milieu mais aussi des caractéristiques du fluide notamment de sa viscosité et donc de sa température. Celle-ci est donc mesurée par un étalon de température.

La qualité des mesures effectuées aux différentes valeurs de charge est discutée à l'aide d'un graphique où l'on porte V/t en fonction de ΔH .

II- Méthode des ondes cinématiques

II-1- Théorie des ondes cinématiques

La théorie des ondes cinématiques (KDW), introduite par Beven et German (1981), suppose que le flux q dépend de la teneur en eau dans les macropores (θ_{ma}) et que l'écoulement dans ces derniers domine dans le processus de transport.

Le transfert dans la matrice est géré par des phénomènes de diffusion et de sorptivité alors que dans les macropores, l'écoulement n'est induit que par des forces gravitaires et est assimilé à une onde cinématique.

Beven et German ont pu tracer des graphes $q_{ma}(\theta_{ma})$ pour différents arrangements de macroporosité et ont déduit que l'allure des différentes courbes était de la forme :

$$q_{ma} = b(\theta_{ma})^a$$

où b est la conductance (m/s) et a un exposant sans dimension

En régime non permanent un paramètre dispersif v est introduit dans la formule et devient :

$$q_{ma} = b(\theta_{ma})^a - v \frac{d\theta}{dt}$$

II-2- Dispositif expérimental

C'est un dispositif en infiltration qui consiste à mesurer, pour différentes pluies apportées, d'une part la masse de l'échantillon et d'autre part la masse de l'eau drainée. Le dispositif expérimental est décrit en annexe 2. Il est constitué de :

- Un peson série AL de portée 10 Kg permettant de peser la masse de l'échantillon.
- Un peson série AG de portée 1 Kg permettant de peser l'eau de drainage recueillie.
- Un porte échantillon composé de deux parties : la partie en forme d'entonnoir permettant d'assurer l'écoulement de l'eau ; elle est posée sur un plateau qui est fixé sur le peson, et la deuxième partie composée d'un disque en PVC et d'une grille en inox permettant de tenir l'échantillon.
- Un simulateur de pluie.
- Un bac de récupération d'eau.
- Un système électronique assurant l'alimentation des pesons et la mesure.
- Une boîte Campbell 21X.

L'ensemble est monté sur un support métallique.

L'étalonnage de ce système est nécessaire après tout changement dans le dispositif. Dans notre cas un étalonnage est fait avant et après chaque expérience. Le détail de l'étalonnage des pesons AL et AG est présenté en annexe 3.

II-3- Protocole expérimental

Différentes intensités de pluie ont été imposées successivement à l'entrée du cylindre. Ces intensités varient selon les échantillons du sol de 10 à 442 mm/h. Le tableau 2 récapitule les intensités de pluie appliquées ainsi que le temps (en heure) de début et de la fin de chaque pluie. Le pas du temps pour l'acquisition des données est de 2 secondes.

Tableau 2: Caractéristiques des pluies appliquées lors des expériences des ondes cinématiques

Echantillons	Pluie	Intensité (mm/h)	Temps de début de pluie (h)	Temps de la fin de pluie (h)
LM1	1	25.2	0	0.200
	2	55.9	0.200	0.383
	3	113.4	0.383	0.533
	4	170.3	0.533	0.717
	5	282.7	0.717	0.817
	6	435.2	0.817	0.883
LFV1	1	24.4	0	0.199
	2	56.4	0.199	0.316
	3	113.1	0.316	0.466
	4	174.3	0.466	0.616
	5	277.2	0.616	0.766
	6	424.6	0.766	0.858
S1FV1	1	51.0	0	0.317
	2	60.9	0.317	0.567
	3	125.5	0.567	0.750
	4	187.7	0.750	0.950
	5	293.8	0.950	1.150
	6	441.6	1.150	1.367
LFV2	1	24.0	0	0.317
	2	59.8	0.317	0.567
	3	121.2	0.567	0.683
	4	187.1	0.683	0.833
	5	303.5	0.833	0.889
S1FV2	1	10.4	0	0.485
	2	23.9	0.485	0.602

N.B. - L'expérience a été annulée pour l'échantillon S1M1 en raison d'une stagnation de l'eau en surface dès la première pluie.

- Pour les échantillons LFV2 et S1FV2, la stagnation de l'eau en surface a limité le nombre de pluies apportées respectivement à 5 et 2 pluies.

III- Méthode DRIP

III-1- Dispositif expérimental

C'est un dispositif en infiltration qui consiste à mesurer, pour différentes pluies apportées, d'une part le potentiel matriciel à différentes profondeurs en fonction du temps (1 mesure toutes les 30 secondes) grâce aux microtensiomètres liés aux capteurs de pression contenues dans un boîtier électronique Campbell, et d'autre part la masse de l'eau drainée. Le dispositif expérimental est décrit en annexe 4. Il est constitué de :

- Un disque en PVC dans lequel on a mis une couche de sable fin ramené à saturation, sur ce sable on pose l'échantillon du sol. Ce disque est lié en bas au centre à un tuyau en plastique par une membrane perméable. Le tuyau se termine en bas par un robinet de sortie d'eau de drainage. L'ensemble est supporté par une structure métallique.

- Une balance, liée au système d'acquisition Campbell, permettant de peser instantanément l'eau de drainage recueillie.
- Un simulateur de pluie.
- Un bac de récupération d'eau de drainage.
- Une boîte Campbell CR10X.

III-2- Protocole expérimental

Différentes intensités de pluie ont été imposées successivement à l'entrée du cylindre. Des succions ont été également imposées en baissant le niveau de sortie d'eau de drainage soit simultanément ou séparément par rapport au début d'une pluie. Pour chaque pluie et/ou succion on attend que l'écoulement en régime permanent soit atteint. Le pas du temps pour l'acquisition des données est de 30 secondes.

Pour chaque palier de régime permanent, on calcule le flux d'eau de drainage moyen (q) et le gradient de potentiel hydrique entre les différents microtensiomètres ($\Delta H/\Delta Z$) (H étant le potentiel hydrique total = $h - z$ où h est le potentiel hydrique matriciel mesuré grâce à la Campbell et z est la profondeur du microtensiomètre) et on détermine la conductivité hydraulique K grâce à la loi de Darcy. Ensuite on peut tracer la courbe $K(h)$ pour l'ensemble des paliers " régime permanent ".

IV- Méthode WIND

Wind (1968) (dans Tamari et al., 1993) a développé une méthode pour déterminer simultanément les caractéristiques $h(\theta)$, $K(\theta)$ d'un sol. C'est une méthode en évaporation et depuis en infiltration.

IV-1- Modèles

Dans cette méthode on fait l'hypothèse que la courbe de rétention est décrite par un modèle paramétré tel que celui proposé par Van Genuchten (1980) :

$$h(\theta) = 1/\alpha \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{1/n}$$

avec $m = 1 - 1/n$

où h est le potentiel matriciel en mètres et θ la teneur en eau ($m^3.m^{-3}$). Cette expression utilise quatre paramètres :

- θ_r , teneur en eau résiduelle définie comme étant la teneur en eau lorsque h tend vers $-\infty$ ($m^3.m^{-3}$);
- θ_s , teneur en eau à saturation ($m^3.m^{-3}$);
- α (m^{-1}) et n .

Ces deux derniers paramètres caractérisent la forme de la courbe.

Pour la conductivité hydraulique, on utilise un modèle de Mualem-Van Genuchten (1976) :

$$K(\theta) = K_s \Theta^n \left[1 - (1 - \Theta^{1/m})^m \right]^2 \quad \text{avec} \quad \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

où K_s est la conductivité hydraulique à saturation

On peut également utiliser le modèle dit log-polynomial :

$$\text{Log}_{10}[K(\theta)] = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3$$

où les a_i sont les paramètres à ajuster.

IV-2- Principe de l'algorithme de Wind

- Courbe de rétention :

Dans l'algorithme de Wind original (1968), il est fait l'hypothèse que l'échantillon peut être divisé en plusieurs couches ayant chacune une teneur en eau constante à un instant donné, correspondant aux profondeurs de mesure du potentiel matriciel. La teneur en eau de chaque couche, et donc la teneur en eau moyenne de l'échantillon, peut être estimée à partir des mesures du potentiel matriciel à chaque instant d'acquisition.

Dans cet algorithme, la courbe de rétention est estimée par inversion et la conductivité hydraulique est calculée par la loi de Darcy. On fait correspondre les mesures $h_m(t, z)$ en fonction du temps et aux différentes profondeurs z (profondeurs de mesure) avec le modèle $h(\theta)$ de Van Genuchten (1980). On en déduit un profil de teneur en eau estimé $\theta_e(t, z)$ dont on fait la moyenne sur z : $\theta_e(t)$. Cette teneur en eau moyenne est alors comparée à la teneur en eau moyenne mesurée $\theta_m(t)$ issue des mesures de masse. Tant qu'il n'y a pas coïncidence entre ces deux valeurs, on réalise une itération sur les paramètres du modèle ($\theta_r, \theta_s, \alpha$ et n arbitrairement initialisés).

Les deux critères de convergence sont la variation de la somme des carrés des écarts entre les valeurs mesurées et estimées de teneur en eau entre deux itérations, et la variation relative des paramètres entre deux itérations successives. Typiquement, ces critères de convergence sont fixés à 10^{-3} en valeur relative.

Un schéma synthétique de l'algorithme de Wind est donné en annexe 5.

- Courbe de conductivité hydraulique à saturation :

La relation $K(\theta)$ est alors calculée à partir de la loi de Darcy :

$$K(\theta) = \frac{-q_z}{\left[\left(\frac{\Delta h}{\Delta z} \right) - 1 \right]}$$

Le flux q_z (m.s^{-1}) à la profondeur z est calculé de la manière suivante (Mohrath et al., 1997) :

$$q_z = q_{z+1} + \left[\frac{\Delta S}{S_{col} \Delta t} \right]_{z, z+1}$$

où ΔS est la variation du stock hydrique dans une couche de sol élémentaire ayant la surface S_{col} entre t et $t+\Delta t$.

Le flux étant nul à la base, $q_{z_{max}}$ est connu et par incrémentation, tous les flux peuvent être déterminés jusqu'à la surface ($z = 0$). Les gradients de potentiel $\Delta h/\Delta z$ sont connus car z est connu et h est mesuré.

Ainsi les couples (K_i, θ_i) sont obtenus aisément car $\Delta h/\Delta z$ est discret. La courbe $K(\theta)$ est ensuite ajustée par le modèle de Mualem-Van Genuchten.

- Remarques :**
- Dans le cas de l'infiltration, la reconstitution du profil de teneur en eau est réalisé différemment par rapport à l'évaporation. C'est une fonction logistique qui permet d'ajuster le profil de teneur en eau. Pour plus de détail se référer à Kaprélian (1999).
 - Une analyse d'erreurs de la méthode Wind en évaporation a été réalisée par Mohrath et al. (1997).

IV-3- Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental, représenté en annexe 6, est constitué de deux boîtiers électroniques contenant chacun six capteurs de pression reliés à 6 tensiomètres, d'une centrale d'acquisition de type Campbell, d'un ordinateur, de deux balances, d'un échantillon de sol dans son cylindre, d'un simulateur de pluie alimenté par l'eau déminéralisée grâce à une pompe péristaltique. Le cylindre contenant l'échantillon est en acier, a un diamètre de 15 cm environ et une hauteur de 7 cm. Il est percé de six trous, respectivement à 5, 10, 15, 30, 50 et 65 mm de profondeur.

Ce dispositif permet le suivi de deux échantillons en simultané, mais les essais en évaporation et en infiltration ne peuvent être menés simultanément, le pas d'acquisition n'étant pas le même.

L'ensemble boîtiers, circuit hydraulique, échantillon du sol est posé sur une balance. Celle-ci permet de mesurer la masse globale de l'échantillon à chaque acquisition (toutes les 20 minutes pour l'évaporation et toutes les 30 secondes pour l'infiltration).

Les capteurs de pression sont des capteurs différentiels mesurant une différence de pression entre la pression atmosphérique et la pression de l'eau du sol. Ils délivrent un signal en mV, qui est converti en mètres d'eau par un étalonnage (cf. annexe 7). Chaque capteur est relié à une bougie poreuse par un capillaire rempli d'eau dégazée pour éviter la cavitation. Une fois mise en place dans le sol, l'eau de la bougie poreuse, initialement à pression atmosphérique, se trouve en contact avec l'eau du sol qui est sous tension. L'eau de cette bougie va s'équilibrer avec l'eau du sol. L'ensemble bougie, capillaire, capteur de pression constitue un circuit hydrauliquement étanche.

Les boîtiers électroniques délivrent à la centrale d'acquisition de données les tensions électriques provenant des capteurs. Ces données sont transférées vers l'ordinateur où elles sont stockées.

Le simulateur de pluie est constitué d'une série d'aiguilles hypodermiques distribuées selon un réseau carré de 2.5 cm de côté. Il est maintenu au dessus de l'échantillon par un système indépendant. Les aiguilles ont un diamètre intérieur de 0.24 mm. De plus pour éviter l'obstruction des aiguilles par le calcaire, c'est l'eau déminéralisée qui est utilisée.

La pompe utilisée est une pompe péristaltique qui permet d'imposer des flux 'intensité variant entre 0.69 mm/h et 540 mm/h. Son homogénéité a été vérifiée par Kaprelian (1999).

VI-4- Protocole expérimental

Pour chaque échantillon deux essais en évaporation et un essai en infiltration ont été réalisés. Avant la première évaporation le sol étant saturé, les potentiels initiaux sont proches de 0. Les capteurs de pression utilisés commencent à décrocher pour des potentiels de l'ordre de -10 mètres, la raison pour laquelle la première évaporation n'a pas été menée jusqu'à des potentiels de cet ordre. Avant l'essai infiltration une phase de rééquilibrage est nécessaire afin de permettre une redistribution interne de l'humidité et ainsi réduire les écarts entre les potentiels hydriques de surface et de fond. Pour cela l'échantillon est couvert pendant au moins 2 heures.

L'infiltration s'effectue sous un flux faible de l'ordre de 5 mm/h, réglé par la pompe péristaltique. Le flux imposé est très faible dans le but d'obtenir des gradients de potentiels significatifs, qui seront par la suite utilisés dans la procédure de détermination de la conductivité.

Une fois tous les capteurs de pression indiquent des valeurs de potentiel hydrique proches de 0 pour l'ensemble des tensiomètres, on arrête l'essai infiltration et on couvre l'échantillon pour un second rééquilibrage d'environ 1 heure avant de démarrer le deuxième essai évaporation qui est mené cette fois jusqu'à décrochement des capteurs.

RESULTATS PRELIMINAIRES

Dans cette partie, nous ne présenterons que les résultats obtenus jusqu'à la fin de mon séjour. Le traitement des résultats demande beaucoup de temps notamment pour les expériences DRIP et Wind. Seuls les résultats des Ondes Cinématiques qui sont présentés pour les 6 échantillons traités.

I- Conductivité hydraulique à saturation, densité apparente et macroporosité

Le tableau 3 résume les conductivités hydrauliques à saturation (K_{sat}) obtenues pour les six échantillons traités. Sur le même tableau on rapporte les valeurs de la densité apparente et la macroporosité pour les échantillons traités. On constate que les échantillons issus des parcelles labourées présentent des K_{sat} relativement plus élevées que celles des échantillons issus des parcelles en Semis direct. Les densités apparentes varient dans le sens inverse que la K_{sat} . Le sol étant plus dense sur échantillons en semis direct. Le volume des macropores et plus important en labour qu'en semis direct. Par ailleurs, on ne constate pas de différence nette entre les deux types de fumure pour les trois paramètres.

La figure 1 illustre la relation entre la K_{sat} et la macroporosité pour 4 échantillons (LM1, LFV1, S1M1, S1FV1). On constate un bon ajustement des données expérimentales par rapport à la formule de Kozeny-Carmen modifiée.

Tableau 3 : Valeurs de K_{sat} , densités apparentes et macroporosité

Echantillons	Paramètres		
	K_{at} (mm/h)	densité apparente (-)	macroporosité (m ³ /m ³)
LM1	1.985 10 ⁴	1.2986	0.1271
LFV1	8.741 10 ³	1.3468	0.1089
LFV2	3.845 10 ³	-	-
S1M1	4.178 10 ²	1.4667	0.0363
S1FV1	8.852 10 ²	1.4084	0.0723
S1FV2	3.777 10 ²	-	-

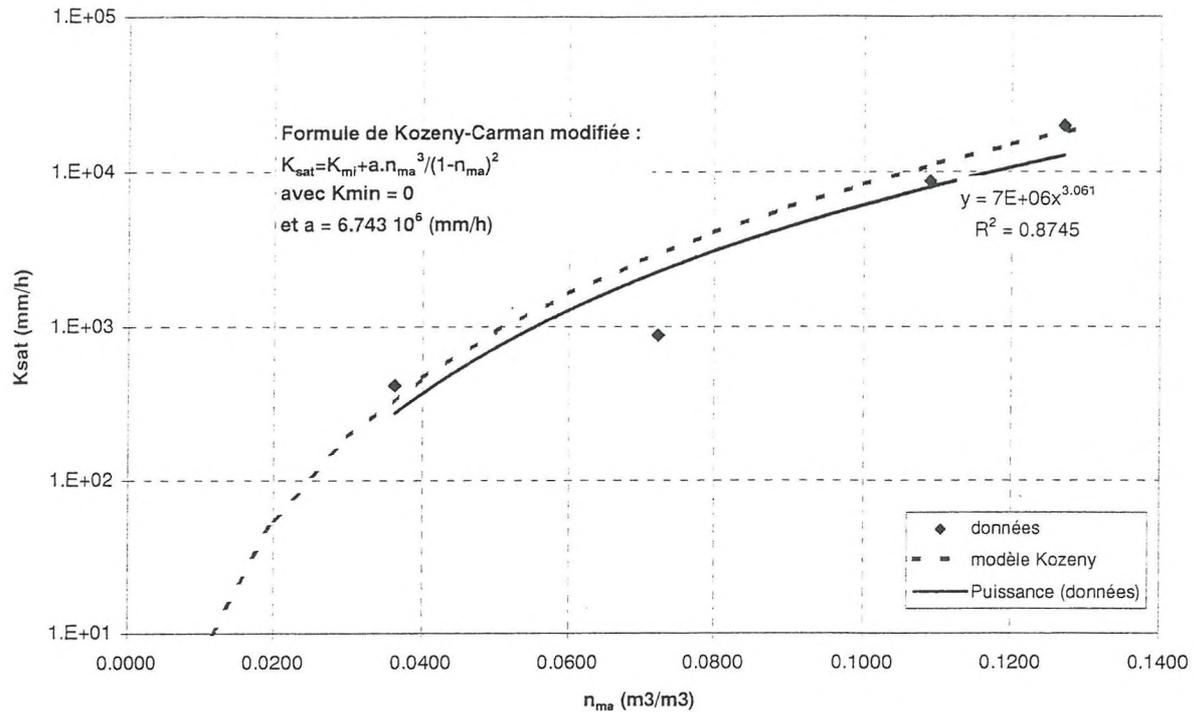


Figure 1 : Relation entre Ksat et macroporosité

II- Résultats des expériences des ondes cinématiques

Pour chaque échantillon on présente la relation $q(\theta)$ avec le paramètre dispersif ν et en régime permanent. Les figures 2a,b ; 3a,b ; 4a,b ; 5a,b ; 6a,b illustrent ces relations respectivement pour les échantillons LM1, LfV1, LfV, S1fV1 et S1fV2. En annexe 8 on présente les relations $\theta(t)$ et $q(t)$ pour les cinq échantillons. Le tableau 4 récapitule les paramètres du modèle des ondes cinématiques pour les cinq échantillons.

Il ressort des figures citées ci-dessus que l'ajustement de $q(\theta)$ est relativement meilleur pour les échantillons LM1, LfV1 et S1fV1. En revanche, pour tous les traitements l'ajustement de $q(\theta)$ est relativement meilleur pour tous les échantillons. Il faut noter aussi que pour l'échantillon S1fV2 une seule pluie a p  être apportée en raison du flaquage d'eau en surface. Par ailleurs, on constate que les paramètres du modèle des ondes cinématiques sont presque similaires pour les échantillons LM1, LfV1, S1fV1 d'une part et les échantillons LfV2 et S1fV2 d'autre part (tableau 4). Ce constat est du   un effet de date de prélèvement et de stockage qui n'est pas le même pour les deux groupes d'échantillons. Ce qui nous laisse dire qu'il y a plutôt un effet date de prélèvement et de stockage que de travail du sol.

La relation liant les paramètres des ondes cinématiques entre eux montre qu'il y a une corrélation entre les paramètres a et b (figure 7).

Tableau 4 : Récapitulatif des paramètres du modèle des ondes cinématiques pour les échantillons traités

Echantillons	Paramètres du modèle		
	a (-)	b (mm/h)	v (mm)
LM1	5.17 (5.11)	$1.604 \cdot 10^9$ ($1.29 \cdot 10^9$)	12.83
LFV1	5.89 (5.22)	$2.684 \cdot 10^{10}$ ($2.13 \cdot 10^9$)	19.80
LFV2	3.03 (3.46)	$1.239 \cdot 10^6$ ($4.265 \cdot 10^6$)	5.85
S1FV1	4.44 (4.80)	$1.610 \cdot 10^8$ ($4.813 \cdot 10^8$)	19.80
S1FV2	2.96 (3.25)	$1.74 \cdot 10^5$ ($4.26 \cdot 10^5$)	5.06

Les valeurs entre parenthèse correspondent aux valeurs des paramètres en régime permanent

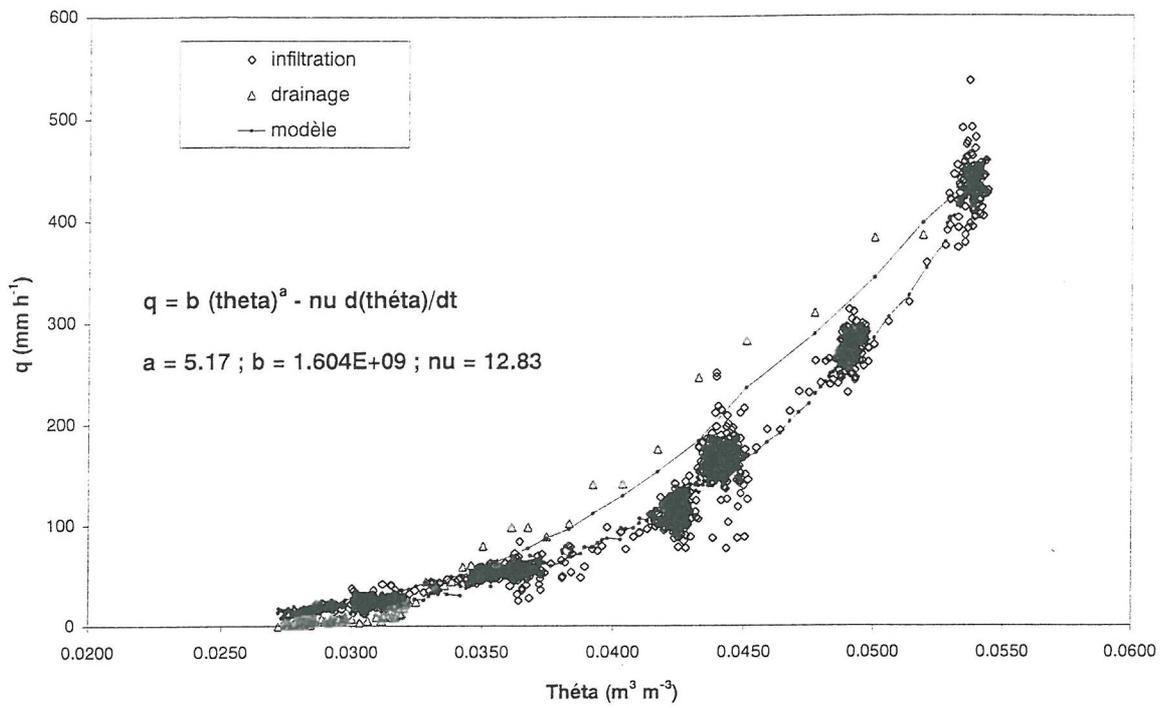


Figure 2a: Relation $q(\theta)$ en moyenne mobile (5) - Echantillon LM1

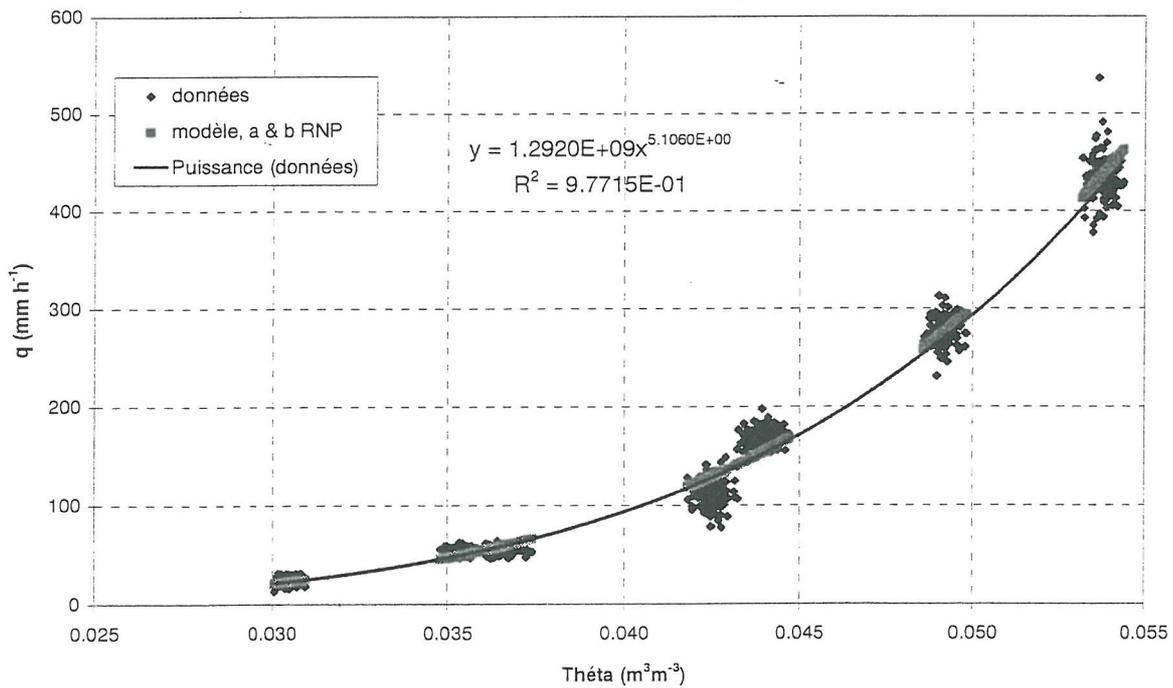


Figure 2b : Relation $q(\theta)$ en régime permanent – Echantillon LM1

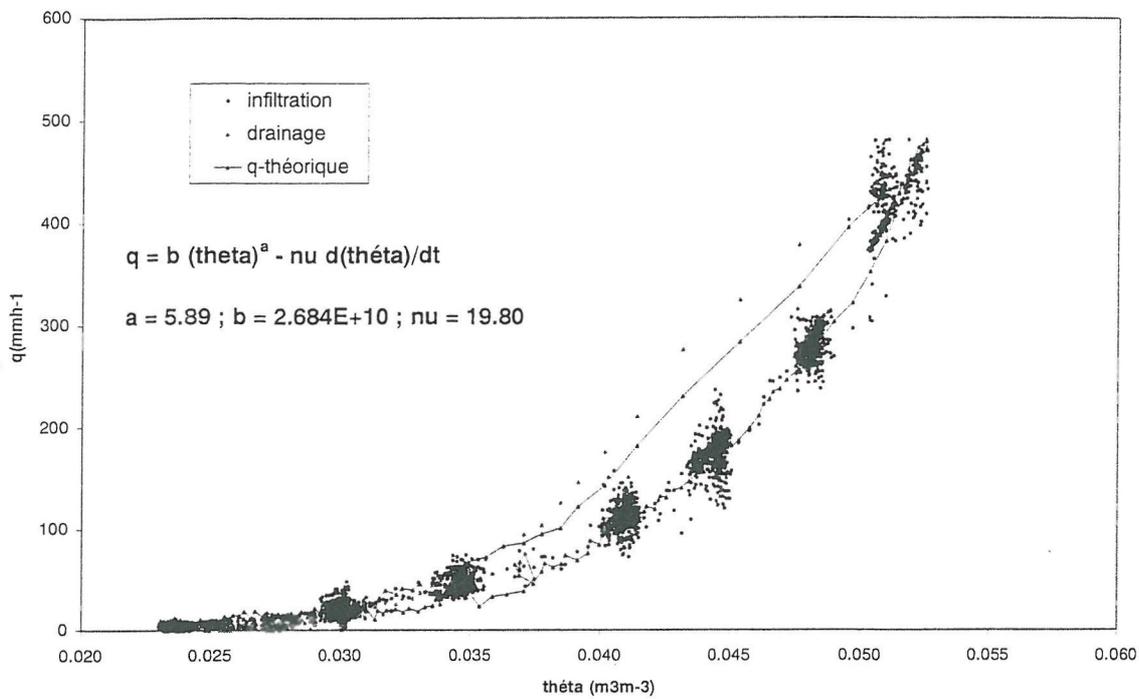


Figure 3a: Relation $q(\theta)$ en moyenne mobile (5) - Echantillon LfV1

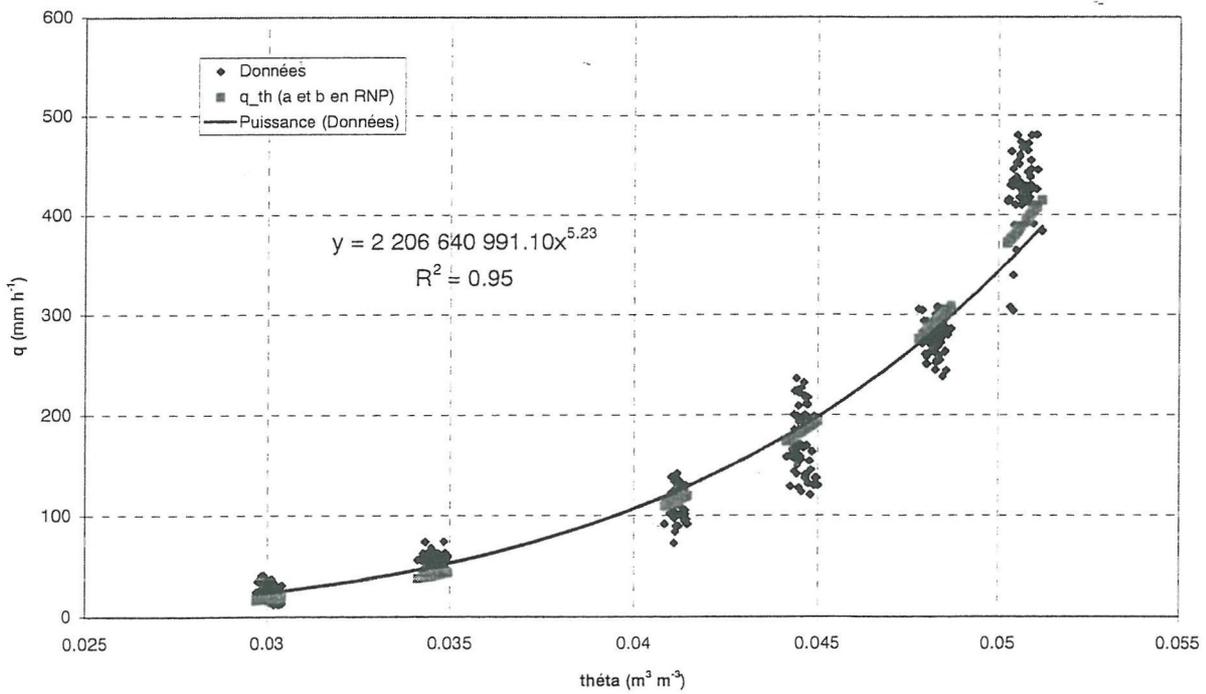


Figure 3b : Relation $q(\theta)$ en régime permanent – Echantillon LfV1

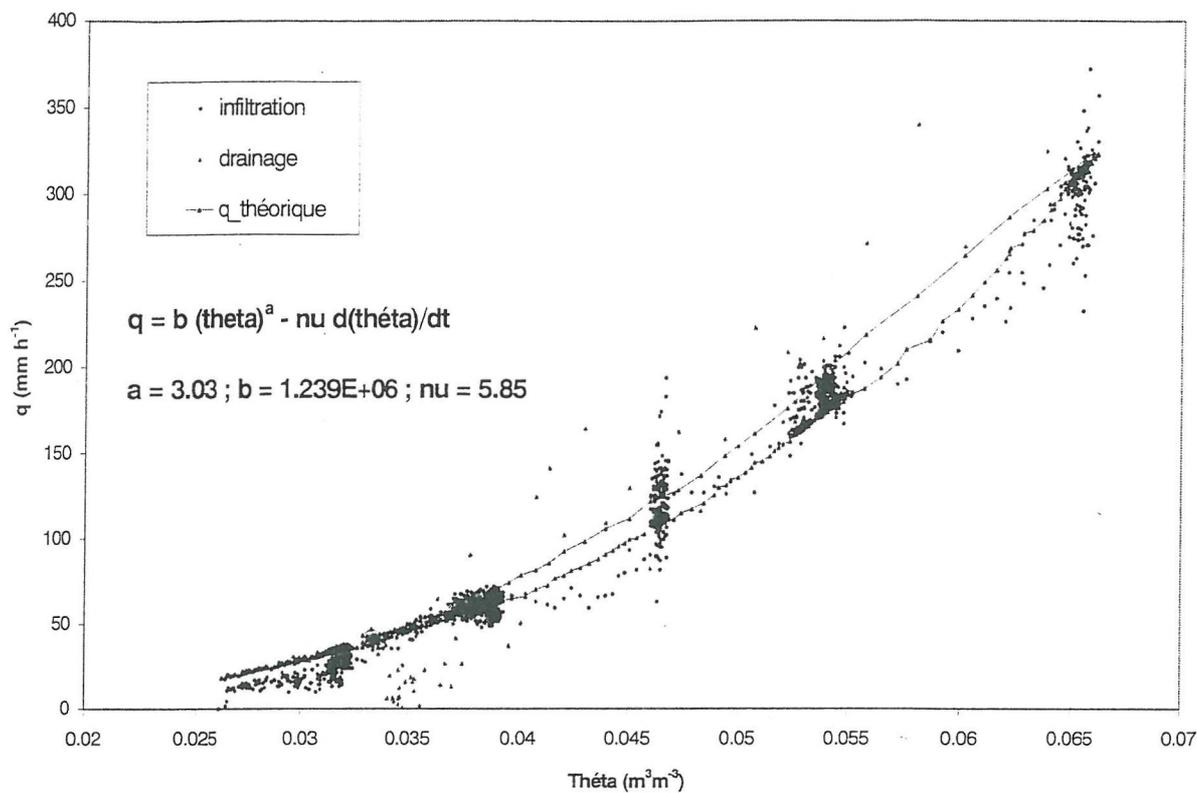


Figure 4a: Relation $q(\theta)$ en moyenne mobile (5) - Echantillon LfV2

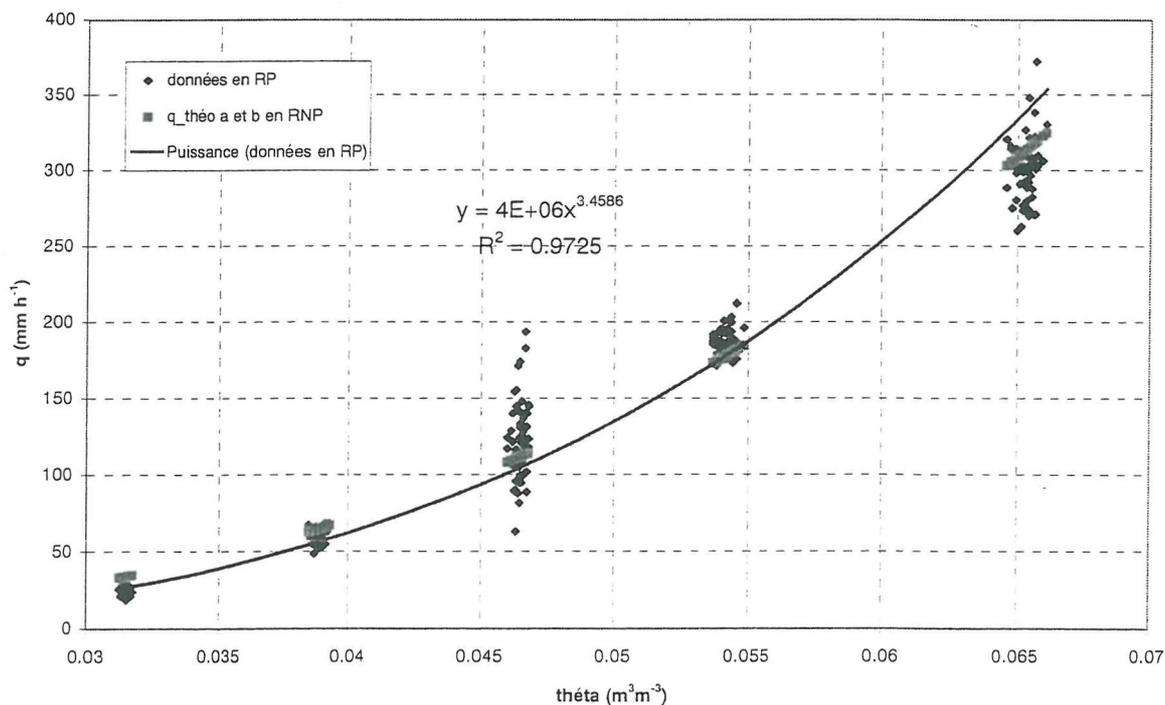


Figure 4b : Relation $q(\theta)$ en régime permanent – Echantillon LfV2

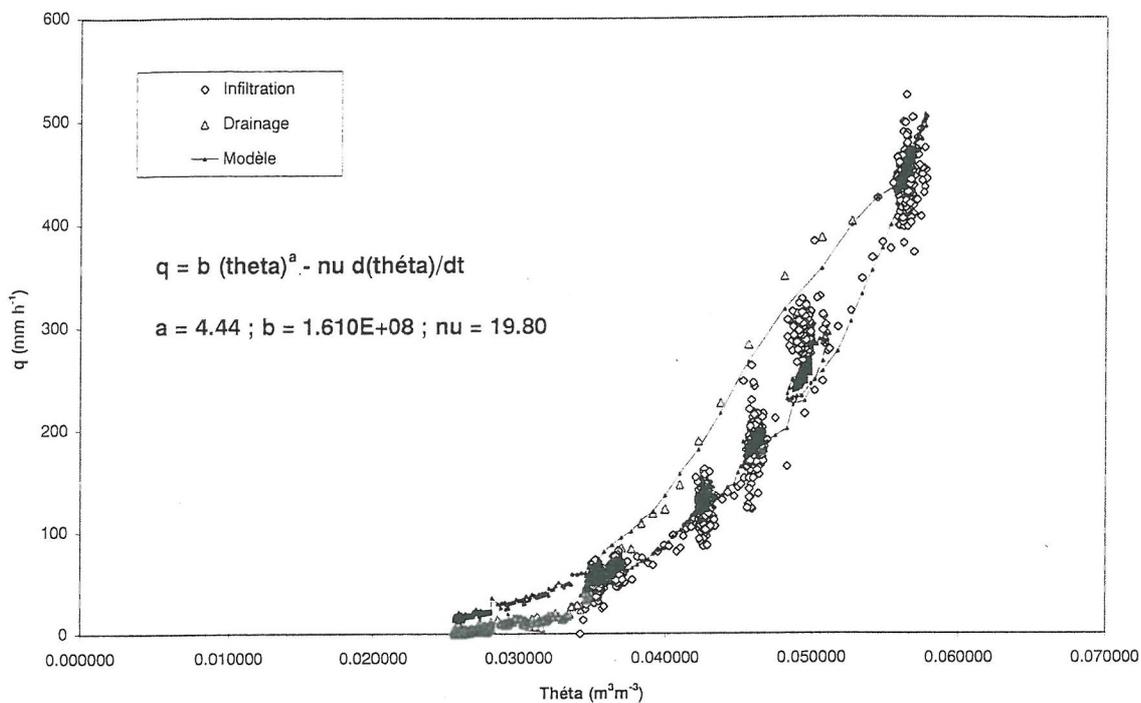


Figure 5a: Relation $q(\theta)$ en moyenne mobile (5) - Echantillon S1FV1

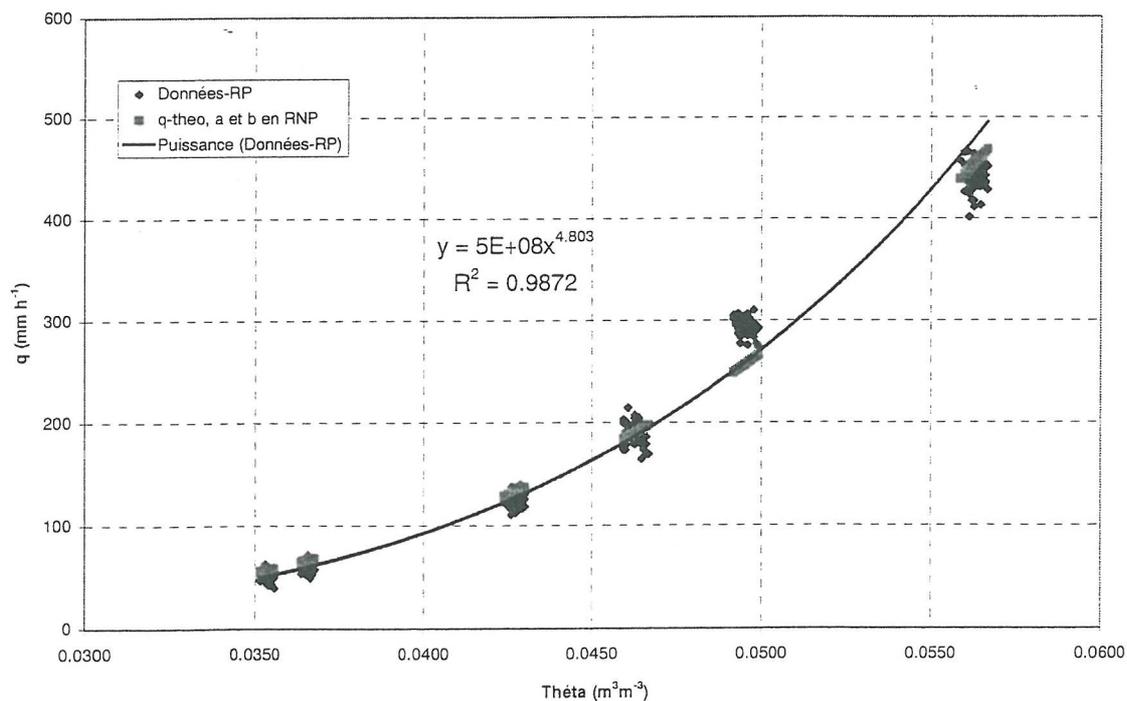


Figure 5b : Relation $q(\theta)$ en régime permanent – Echantillon S1FV1

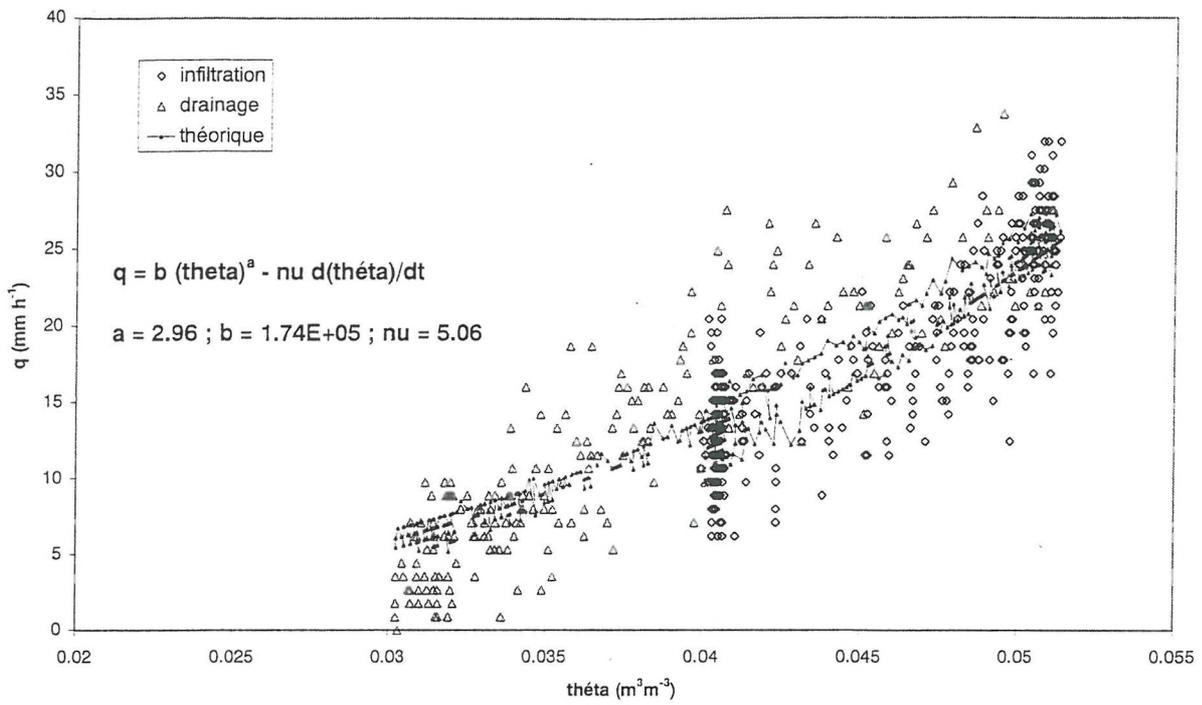


Figure 6a: Relation $q(\theta)$ en moyenne mobile (5) - Echantillon S1FV2

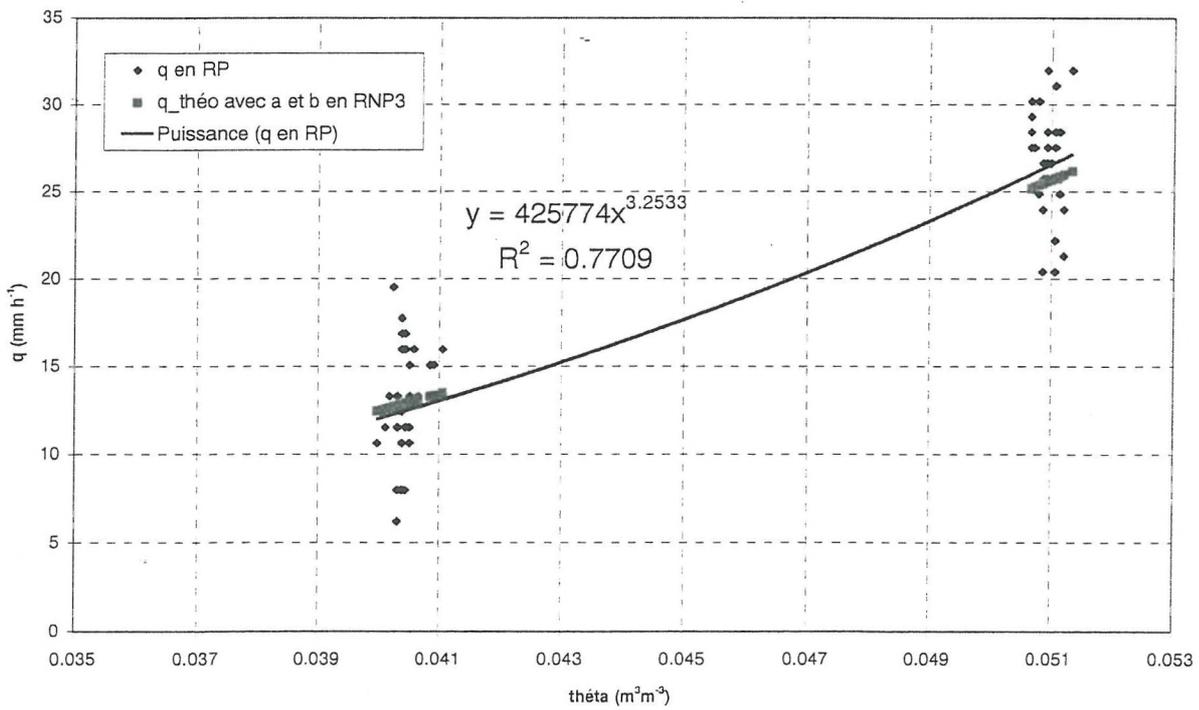


Figure 6b : Relation $q(\theta)$ en régime permanent – Echantillon S1FV2

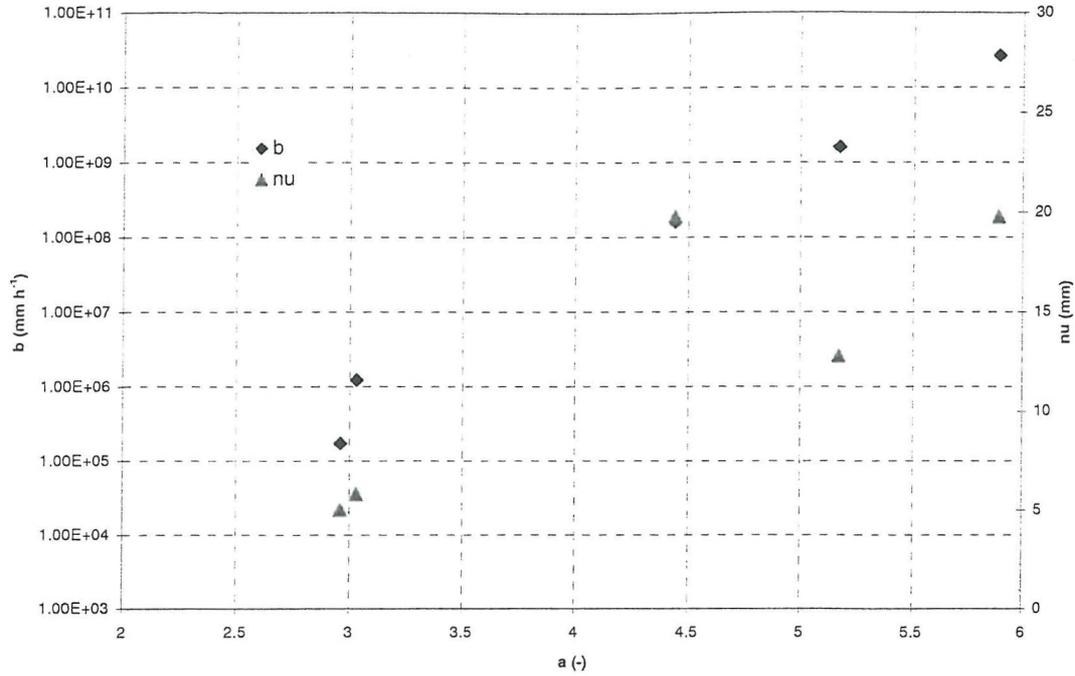


Figure 7 : Relation entre les paramètres du modèle des ondes cinématiques

III- Résultats des expériences DRIP

La méthode DRIP nous a permis de déterminer la relation $K(h)$ dans la gamme du potentiel matriciel compris entre -20 et -1 cmH₂O. La figure 8 illustre cette relation pour les deux échantillons LM1 et LfV1. Cette figure montre que K varie dans l'ensemble entre 1 et 10^2 mm/h environ avec une gamme de variation de h plus importante pour LM1.

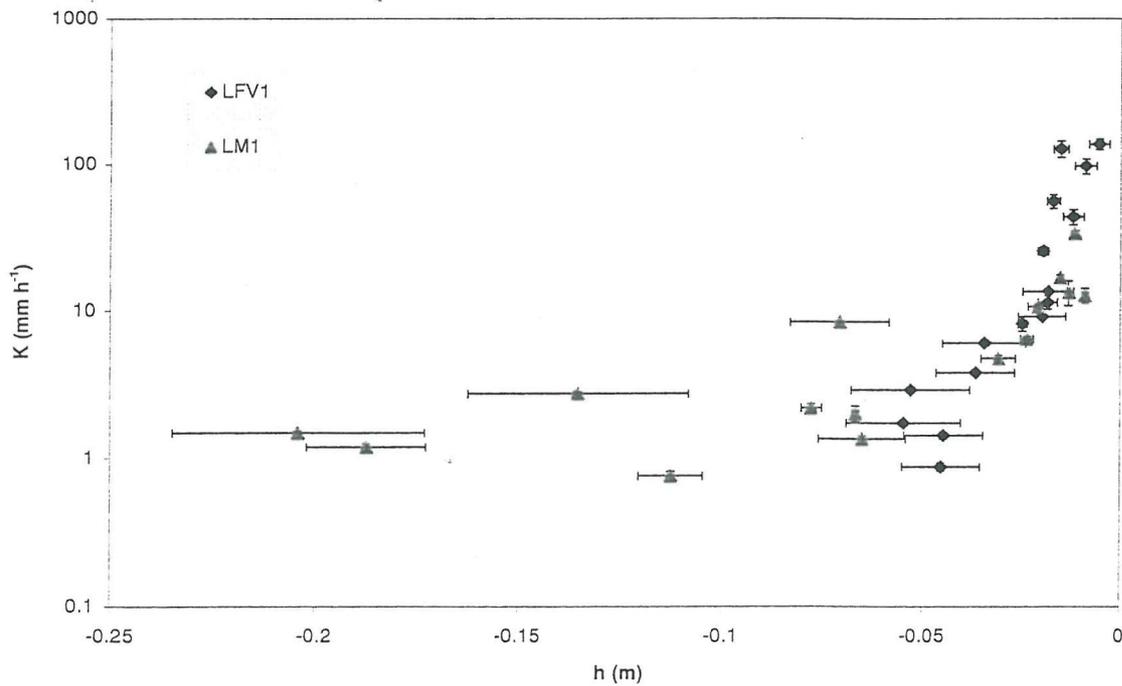


Figure 8 : Relation $K(h)$ par la méthode DRIP pour les échantillons LM1 et LfV1

IV- Résultats des expériences Wind et comparaison des méthodes de mesure

Pour les expériences Wind ($-800 < h < -50$ cm), seules les données relatives aux échantillons LM1 et LFV1 ont pu être traitées. Pour un même échantillon, les trois relations $h(\theta)$, $K(\theta)$ et $K(h)$ sont ajustées pour les deux essais évaporation (évaporation 1 et évaporation 2) et pour l'essai infiltration. On présente respectivement sur les figures 9a,b la relation $h(\theta)$ pour les deux échantillons LM1 et LFV1.

Afin de pouvoir comparer les trois méthodes de caractérisation des propriétés hydrodynamiques du sol (Wind, KDW et DRIP), les paramètres du modèle de Van Genuchten obtenus par la méthode Wind sont utilisés pour ajuster les relations $k(\theta)$ et $k(h)$ pour les méthodes KDW et DRIP. Pour ces deux relations, une extrapolation est effectuée vers la K_{sat} pour le modèle des ondes cinématiques dont la gamme de variation de θ est proche de la saturation ($\theta_{cc} < \theta < \theta_{sat}$). On rapporte respectivement sur les figures 10a,b et 11a,b les relations $K(\theta)$ et $K(h)$ pour les deux échantillons LM1 et LFV1. Sur les mêmes figures, on a représenté également pour les mêmes relations, les résultats relatifs aux deux méthodes KDW et DRIP.

Pour la relation $h(\theta)$, nous constatons que h varie en valeur absolue entre 1 et 10 m pour les deux échantillons LM1 et LFV1 (figures 9a,b). L'ordre des courbes en évaporation et en infiltration est bien respecté et l'hystérésis est bien net notamment pour l'échantillon LM1. Il faut noter que pour l'échantillon LFV1, le traitement des données Wind en évaporation a été effectué sur 2 parties (0-35 heures et 35-70 heures pour l'évaporation 1 et 0-31 heures et 31-55 heures pour l'évaporation 2). Les points d'inflexions visibles sur les courbes évaporations (figure 9b) illustrent bien ces deux parties.

Pour la relation $K(\theta)$ en Wind (figures 10a,b), nous constatons pour les deux échantillons que l'ordre des courbes en évaporation et en infiltration est bien respecté et le phénomène d'hystérésis est bien représenté, avec toutefois des données aberrantes en début de l'essai infiltration lié à un artefact de la méthode. Pour la relation $K(\theta)$ en DRIP et en KDW on constate, pour une gamme θ proche de la saturation, une bonne complémentarité et une bonne concordance des deux méthodes par rapport à la méthode Wind (figures 10a,b). Par ailleurs, nous constatons une très bonne extrapolation du modèle des ondes cinématiques vers la K_{sat} pour les deux échantillons. D'où l'intérêt de la méthode KDW pour la détermination de $K(\theta)$ dans le domaine proche de la saturation.

La même constatation est faite pour la relation $K(h)$ (figures 11a,b) pour laquelle on retrouve une bonne complémentarité et une bonne concordance des trois méthodes, avec une très bonne performance de la méthode KDW pour l'extrapolation de $K(h)$ vers la K_{sat} .

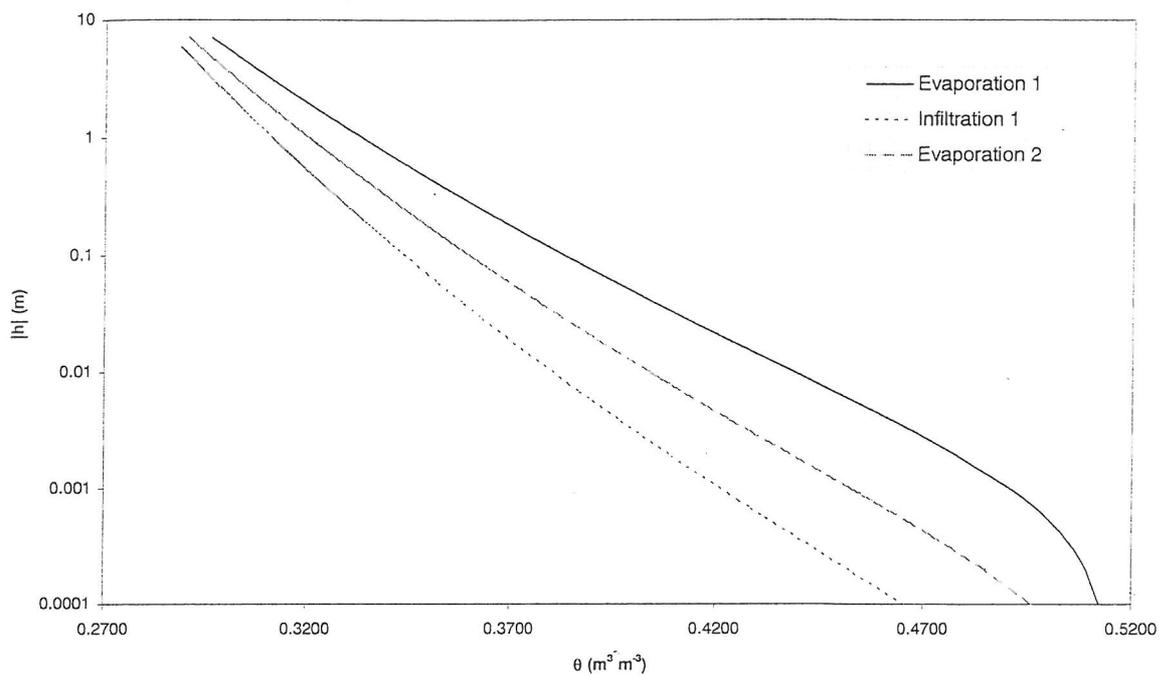


Figure 9a : Relation $h(\theta)$ obtenue par la méthode Wind – Echantillon LM1

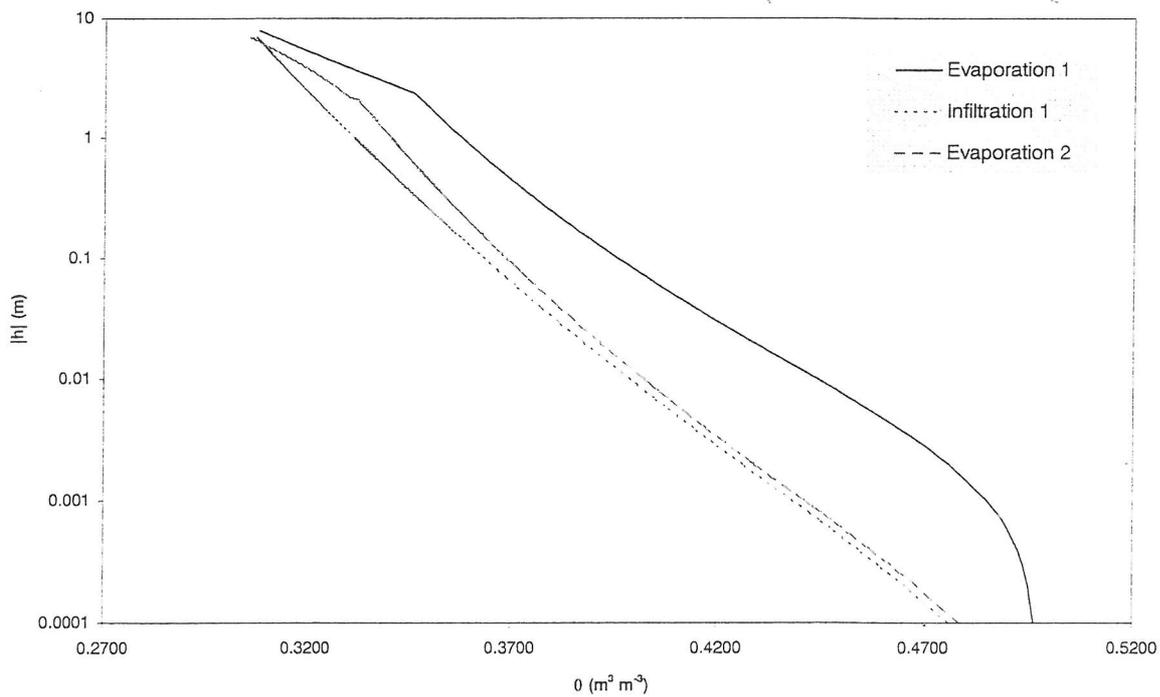


Figure 9b : Relation $h(\theta)$ obtenue par la méthode Wind – Echantillon LfV1

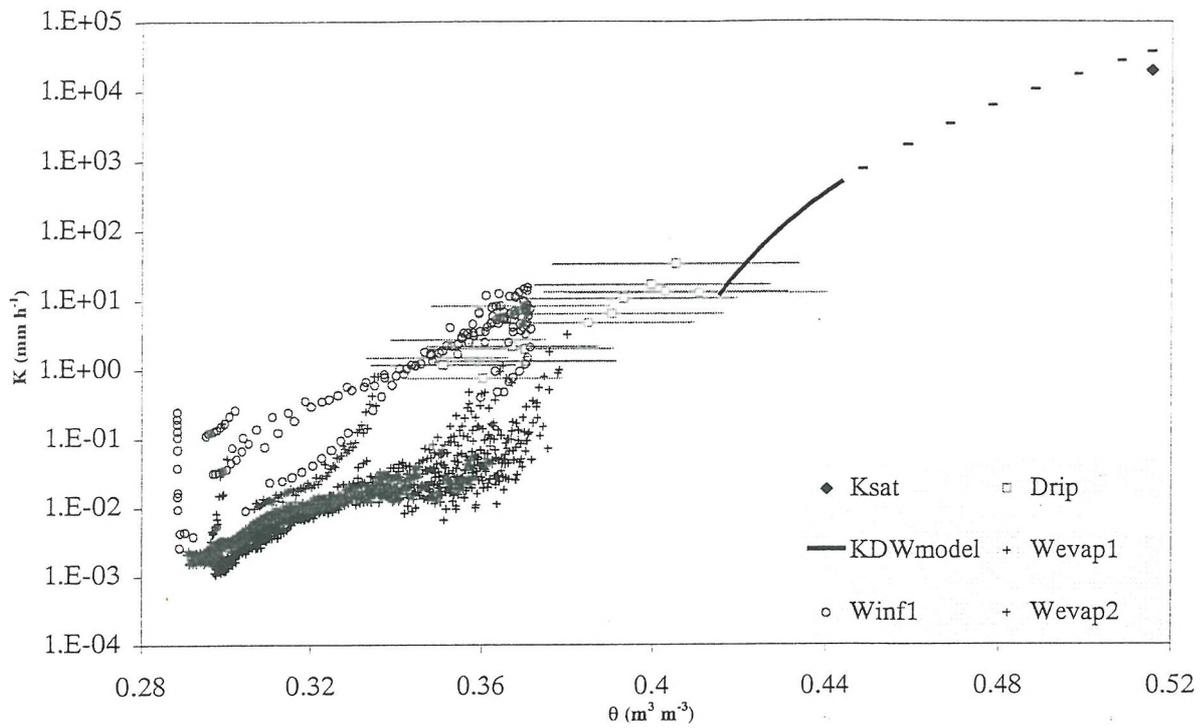


Figure 10a : Relation $K(\theta)$ par les trois méthodes Wind, KWD et DRIP – Echantillon LM1

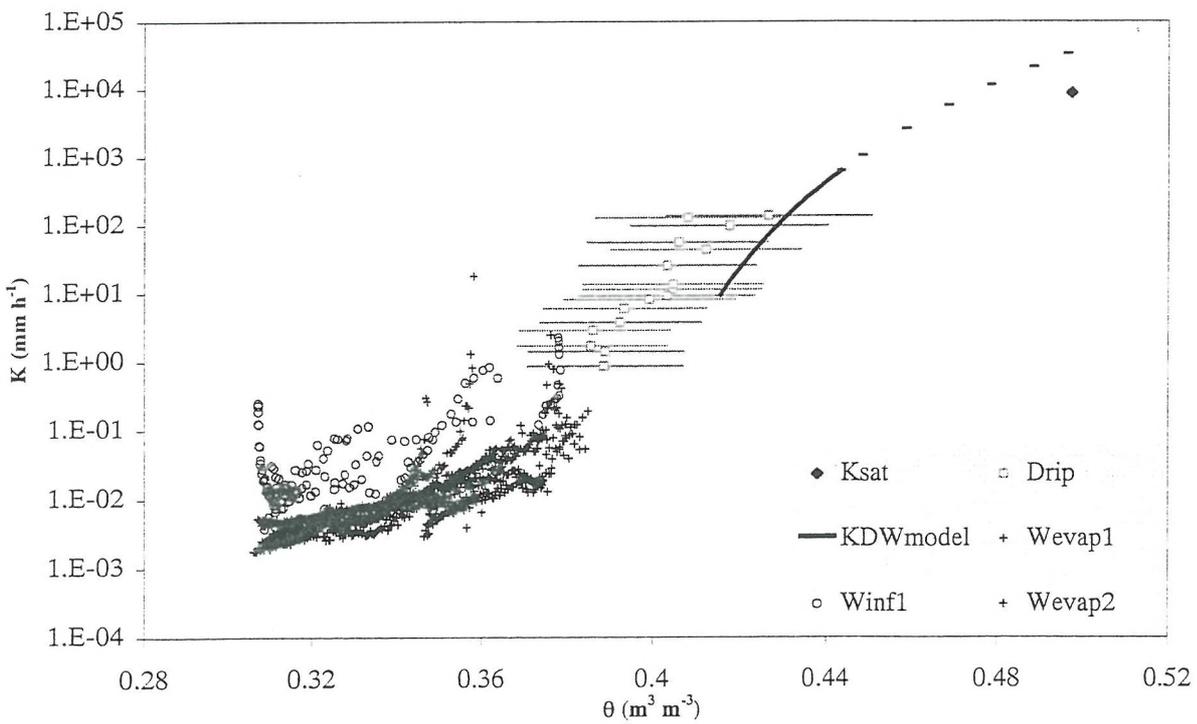


Figure 10b : Relation $K(\theta)$ par les trois méthodes Wind, KWD et DRIP – Echantillon LFV1

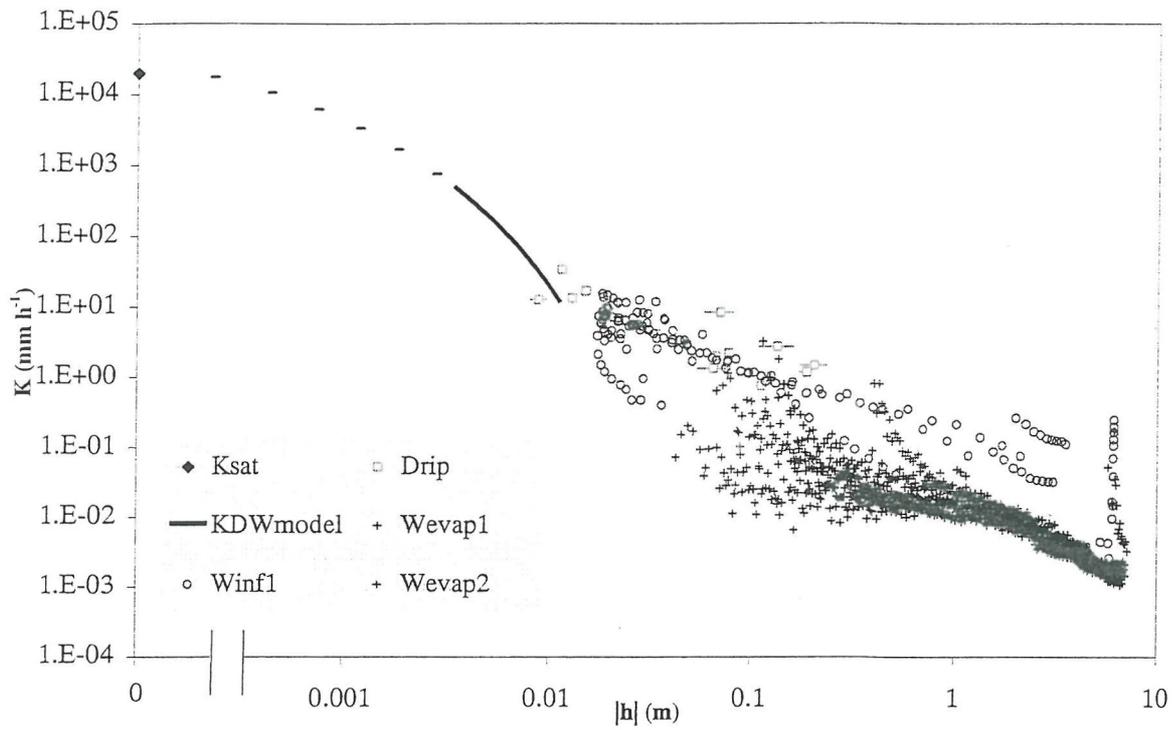


Figure 11a : Relation $K(h)$ par les trois méthodes Wind, KWD et DRIP – Echantillon LM1

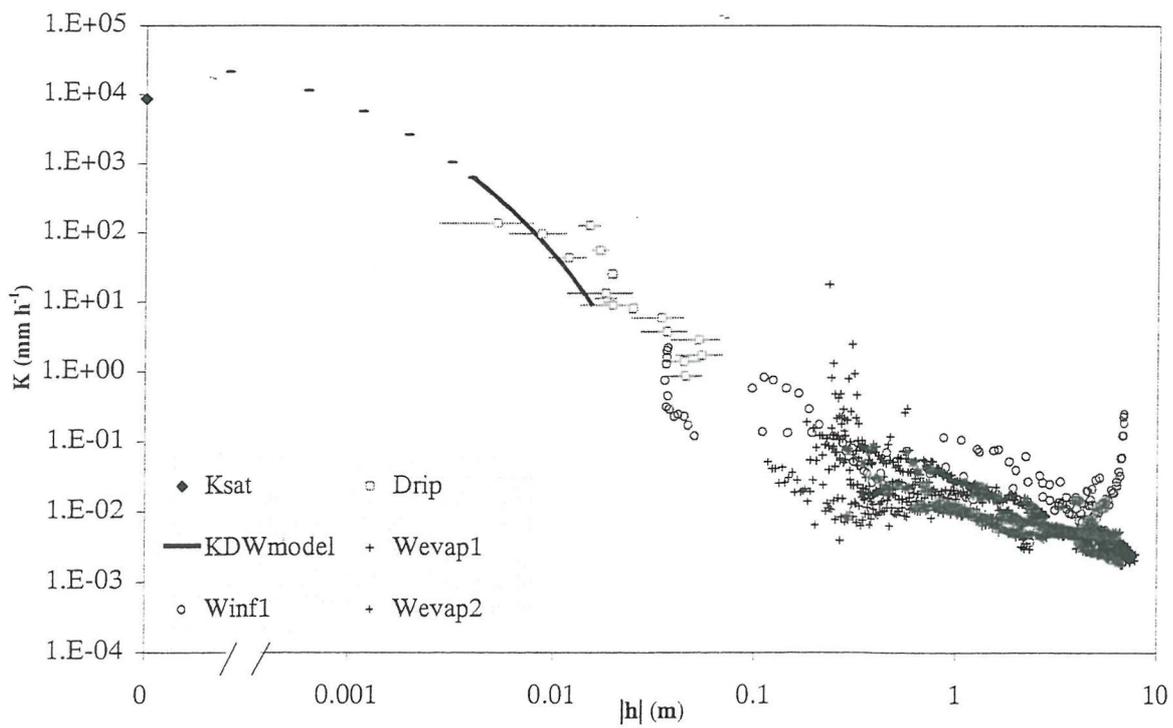


Figure 11b : Relation $K(h)$ par les trois méthodes Wind, KWD et DRIP – Echantillon LFV1

SYNTHESE ET CONCLUSION

Au terme de ce travail, nous concluons que les trois méthodes utilisées sont complémentaires et concordantes pour l'estimation des propriétés hydrodynamiques d'un sol pour des gammes de potentiel hydrique différentes : $-800 < h < -50$ cm pour Wind ; $-20 < h < -1$ cm pour DRIP et $\theta_{cc} < \theta < \theta_{sat}$ pour KDW.

Pour le domaine proche de la saturation, nous avons noté l'intérêt du modèle des ondes cinématiques (KWD) pour l'extrapolation de la conductivité vers la K_{sat} . La corrélation entre les paramètres a et b du modèle KDW est bien retrouvée. Néanmoins, cette méthode présente quelques anomalies liées à la forte sensibilité des pesons et au problème de flaquage de surface sur des échantillons à faible conductivité. Ajoutons à cela des variations de q et θ en régime permanent liées à un débouchage de certains pores.

La méthode DRIP, dont la gamme de mesure de la conductivité est intermédiaire entre la méthode Wind et la méthode KDW, semble plus laborieuse que la méthode des ondes cinématiques permettant d'avoir une meilleure extrapolation de la conductivité vers la K_{sat} à l'aide d'un dispositif plus simple.

Néanmoins, pour les trois relations $h(\theta)$, $K(\theta)$ et $K(h)$, on a pas décelé de différence importante entre les deux échantillons traités (LM1 et LFV1).

Quant à la conductivité hydraulique à la saturation, on a pu constater que ses ordres de grandeur dépendent de la structure du sol (K_{sat} plus élevée sur les échantillons issus de parcelles labourées). En outre, la relation entre K_{sat} et la macroporosité a été bien ajustée par rapport à la formule de Kozeny-Carmen modifiée.

PERSPECTIVES

A court terme, il est souhaitable de tester le modèle de simulation KDW mis au point par Di Pietro et Lafolie (1991) sur nos données expérimentales. il est également important d'approfondir la relation entre les paramètres du modèle cinématique (a , b et v) et la structure du sol. Une comparaison de nos données aux données *in situ* (Alletto, 2002) mérite d'être faite.

A moyen terme des mesures de structure sur nos échantillons par imprégnation à la résine sont nécessaires afin de mieux étudier la relation entre les paramètres hydrodynamiques et la structure du sol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alletto, L., 2002. Travailler le sol sans retournement des horizons de surface. Bilan sur la fertilité physique, chimique et biologique d'un sol limoneux de Bretagne après trois années de travail simplifié. Mémoire d'Ingénieur.

Beven, K., and P. Germann, 1981. Water flow in soil macropores : 2. A combined flow model. *Journal of Soil Science*, 32 :15-29.

Di Pietro, L., and F. Lafolie. 1991. Water flow characterisation and test of a kinematic-wave model for macropore flow in a highly contrasted and irregular double-porosity medium. *Journal of Soil Science*, 42 :551-563.

Kaprélien, A., 1999. Estimation des propriétés hydrodynamiques d'un sol par la méthode de Wind. Rapport de stage de DESS « Eaux souterraines-Hydrogéologie chimique et physique ».

Mohrath, D., L. Bruckler, P. Bertuzzi, J.C. Gaudu and M. Bourlet, 1997. Error analysis of an evaporation method for determining hydrodynamic properties in unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61 : 725-735.

Rousseau, M., 2000. Comparaison des méthodes fondées sur la loi de Darcy et sur les ondes cinématiques pour la caractérisation hydrodynamique de sols structurés non saturés. Mémoire de DEA « Mécanique des milieux géophysiques et environnement ».

Stolte, J., J.I. Freijer, W. Bouten, C. Dirksen, J.M. Halbertsma, J.C. van Dam, J.A. vanden Berg, G.J. Veerman, and J.H.M. Wosten. 1994. Comparaison of six methods to determine unsaturated soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58 : 1596-1603.

Tamari, S., L. Bruckler, J. Halbertsma, and J. Chadoeuf. 1993. A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 :642-651.

Van Gunechten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 :892-898.

Annexes

Annexe 1

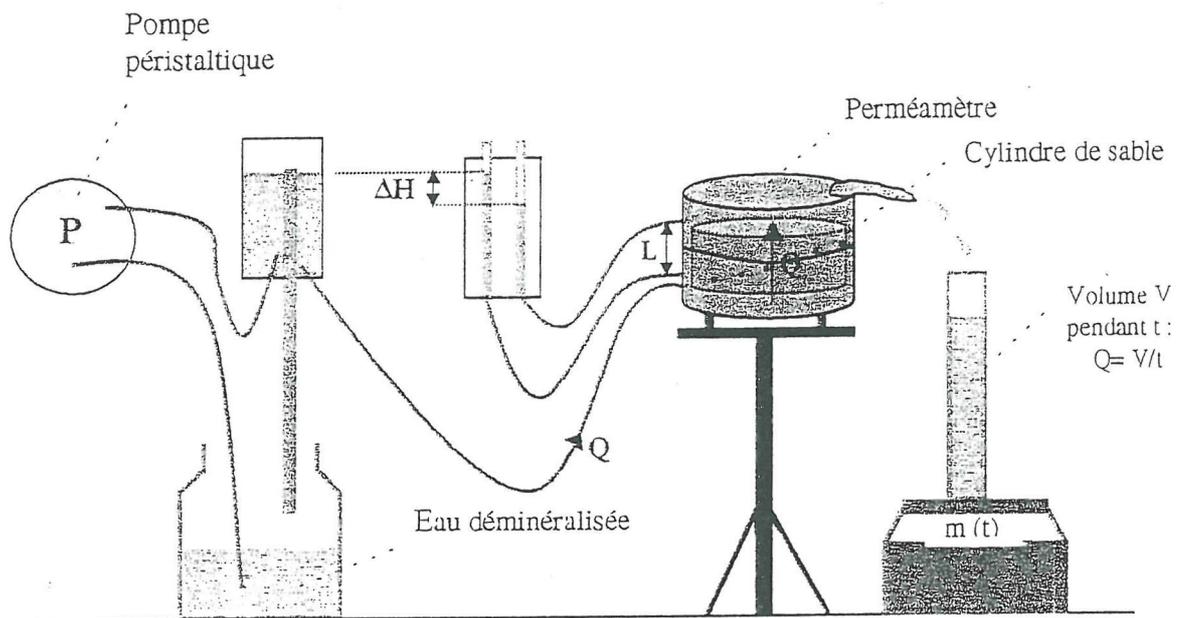
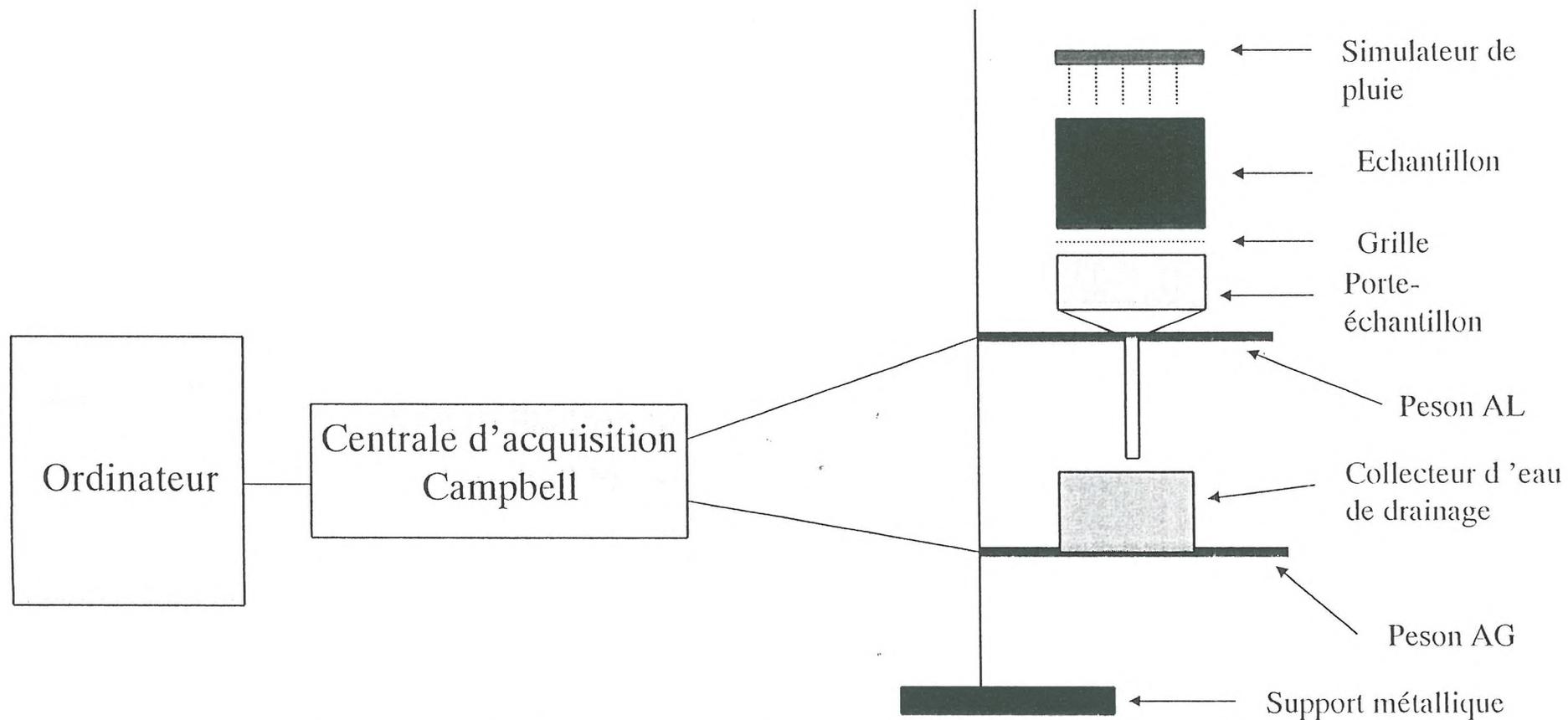


Schéma simplifié du dispositif de mesure de K_{sat}

Annexe 2: Schéma simplifié du dispositif de la méthode des ondes cinématiques



Annexe 3

Étalonnage des pesons AL et AG Expérience Ondes cinématiques

I- Procédure d'étalonnage :

Il consiste à déposer sur les pesons différentes masses (masse-étalons) et à mesurer à intervalle régulier les réponses (signal électrique en mV) données par la Campbell. Ainsi nous laissons chaque masse étalon sur le peson pendant 30 secondes et la Campbell nous fournit 20 mesures moyennes de la tension électrique, soit une mesure moyenne toutes les 1.5 secondes). Deux procédures d'étalonnage ont été effectuées, l'une juste avant la manipe et l'autre juste après la manipe.

Les masses-étalons utilisés sont : 0, 0.5, 5, 50, 200, 1000, 2000 g. La combinaison de ces masses-étalons a permis de constituer, pour chaque peson, les masses suivantes :

- Pour le peson AG (portée de 1 kg): 0, 0.5, 5, 5.5, 50, 50.5, 55, 55.5, 200, 205, 250, 255, 255.5, 1000 et 1000.5 g

- Pour le peson AL (portée de 12 kg) : 0, 5, 50, 55, 200, 205, 250, 255, 1000, 1050, 1200, 1250, 2000, 2050, 2200, 2250, 3000, 3050, 3200, 3250, 4000, 4050, 4200, 4250, 5000, 5050, 5200 et 5250 g.

Il faut noter qu'après la manipe, seules les masses 0, 5, 50, 55, 200, 250 et 1000 g ont été utilisées pour le peson AG et 0, 50, 200, 1000, 1200, 2000, 3000, 4000, 5000 et 5200 g pour le peson AL.

L'équation générale d'étalonnage est une droite :

$$Y = a X + b$$

Où, X est la réponse en mV de la Campbell

Y est la masse en gramme

a et b sont les paramètres d'étalonnage

La qualité de l'étalonnage est jugée par le calcul des résidus (différence entre la masse étalon et la masse théorique).

II- Résultats d'étalonnage

II-1- Echantillons LM1 et LFV1

Les paramètres d'étalonnage avant et après l'expérience sont résumés sur le tableau suivant :

Tableau 1: Paramètres d'étalonnage des pesons AL et AG pour les échantillons LM1 et LFV1

Pesons	Avant expérience		Après expérience	
	AL	AG	AL	AG
Coefficient (a)	872.48	91.169	872.73	91.331
Ordonnée à l'origine (b)	1054.2	- 205.5	1046.9	- 205.2
R ²	1	1	1	1

Les figures 1a-b et 2a-b illustrent respectivement les droites de régression avant et après étalonnage pour les 2 pesons AL et AG et pour les deux échantillons LM1 et LFV1.

II-2- Echantillons S1M1 et S1FV1

Les paramètres d'étalonnage avant et après l'expérience sont résumés sur le tableau suivant :

Tableau 2: Paramètres d'étalonnage des pesons AL et AG pour les échantillons S1M1 et S1FV1

Pesons	Avant expérience		Après expérience	
	AL	AG	AL	AG
Coefficient (a)	418.298	43.535	418.353	43.610
Ordonnée à l'origine (b)	-863.451	2189.963	-863.461	2190.634
R ²	1	1	1	1

Les figures 3a-b et 4a-b illustrent respectivement les droites de régression avant et après étalonnage pour les 2 pesons AL et AG et pour les deux échantillons S1M1 et S1FV1.

II-3- Echantillons LFV2 et S1FV2

Les paramètres d'étalonnage avant et après l'expérience sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3: Paramètres d'étalonnage des pesons AL et AG pour les échantillons LFV2 et S1FV2

Pesons	Avant expérience		Après expérience	
	AL	AG	AL	AG
Coefficient (a)	418.311	43.605	418.413	43.618
Ordonnée à l'origine (b)	-864.309	1950.636	-864.444	1946.899
R ²	1	1	1	1

Les figures 5a-b et 6a-b illustrent respectivement les droites de régression avant et après étalonnage pour les 2 pesons AL et AG et pour les deux Echantillons LFV2 et S1FV2.

III- Courbes d'étalonnage des pesons AL et AG

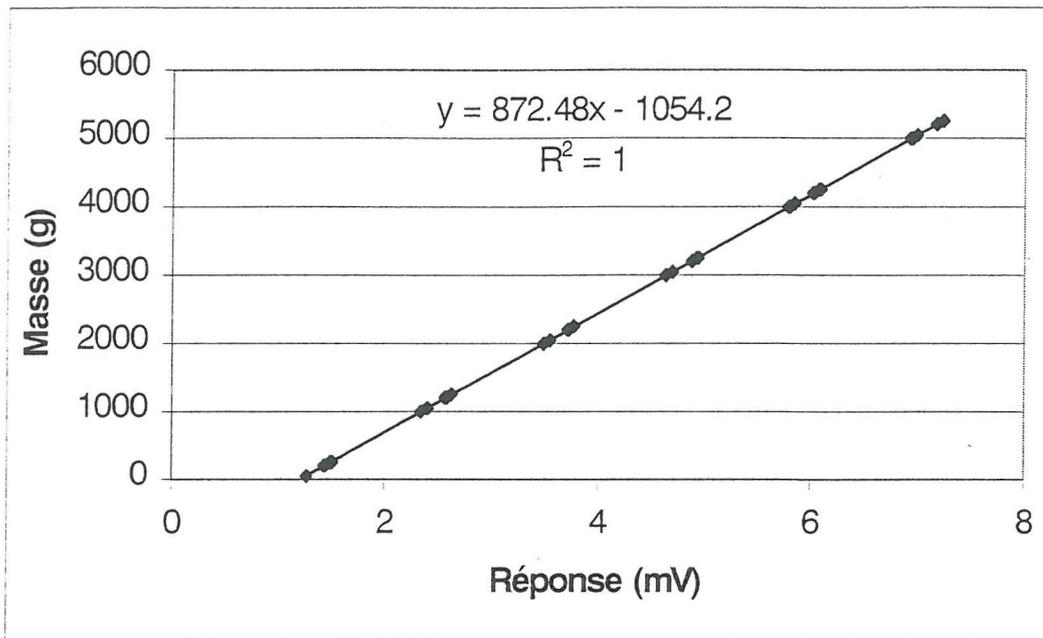


Figure 1a : Etalonnage AL avant expérience – Echantillons LM1-LFV1

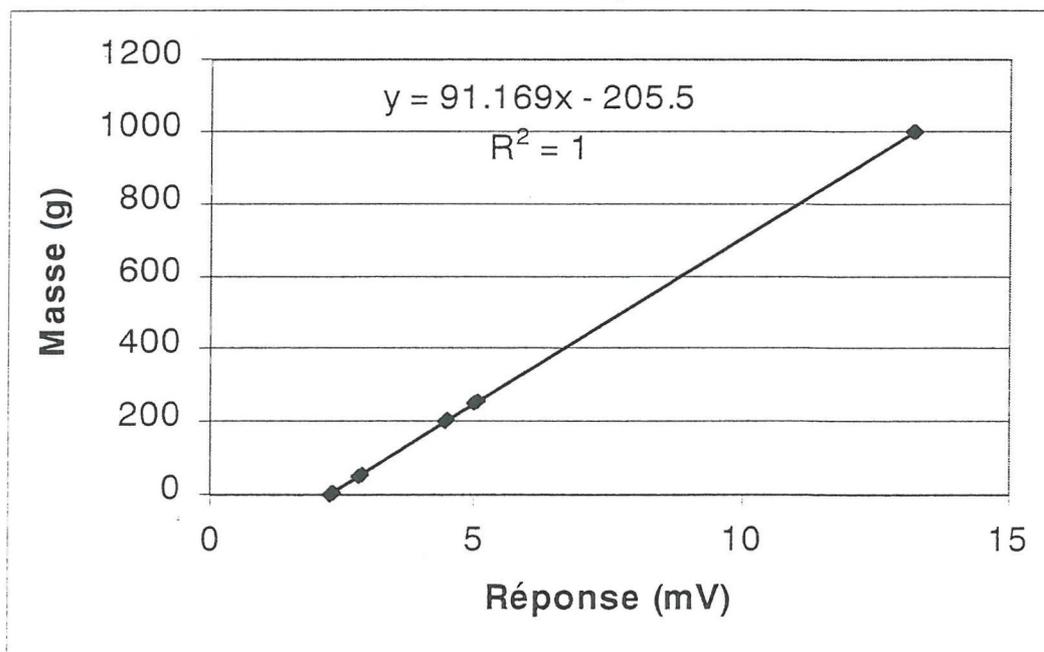


Figure 1b : Etalonnage AG avant expérience – Echantillons LM1-LFV1

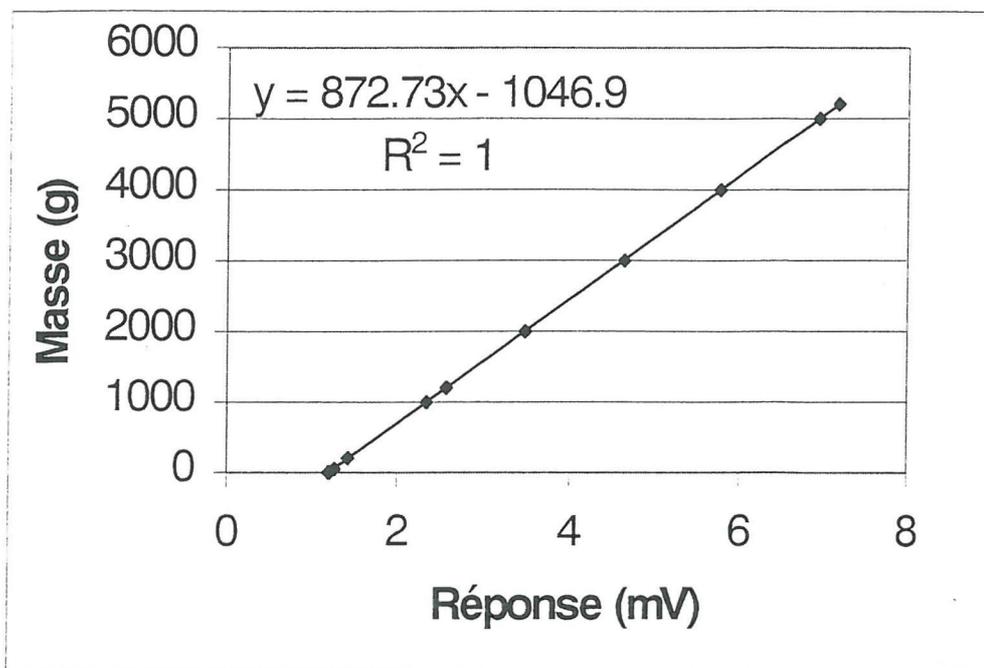


Figure 2a : Etalonnage AL après expérience – Echantillons LM1-LFV1

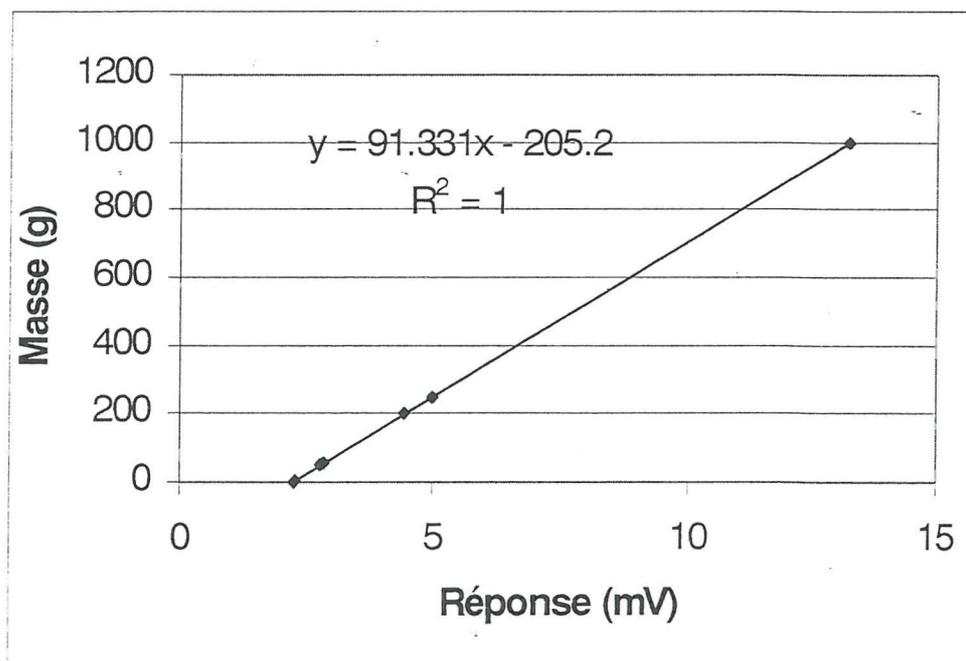


Figure 2b : Etalonnage AG après expérience – Echantillons LM1-LFV1

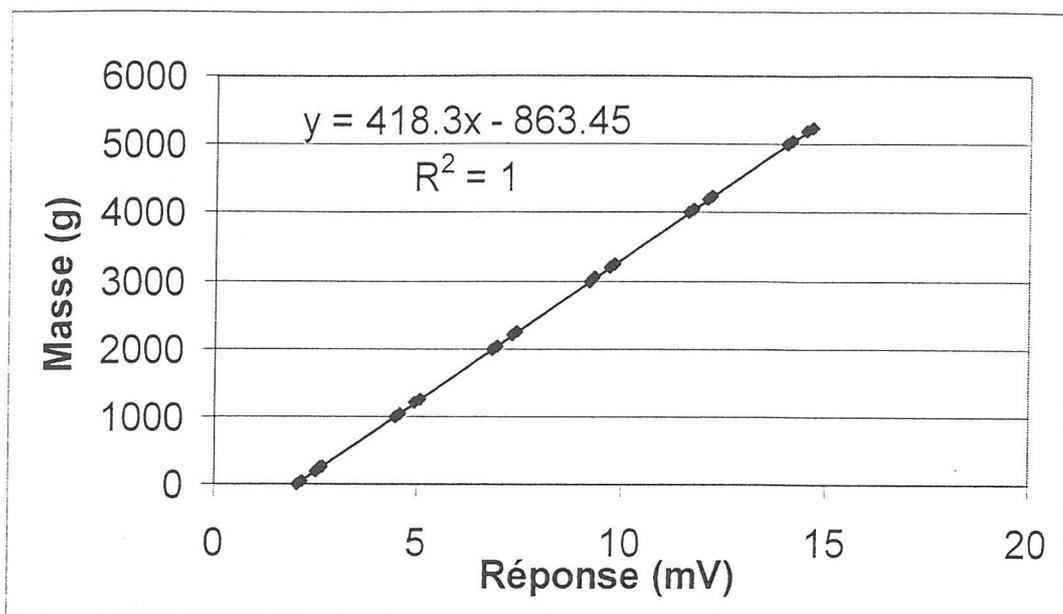


Figure 3a : Etalonnage AL avant expérience – Echantillons S1M1-S1FV1

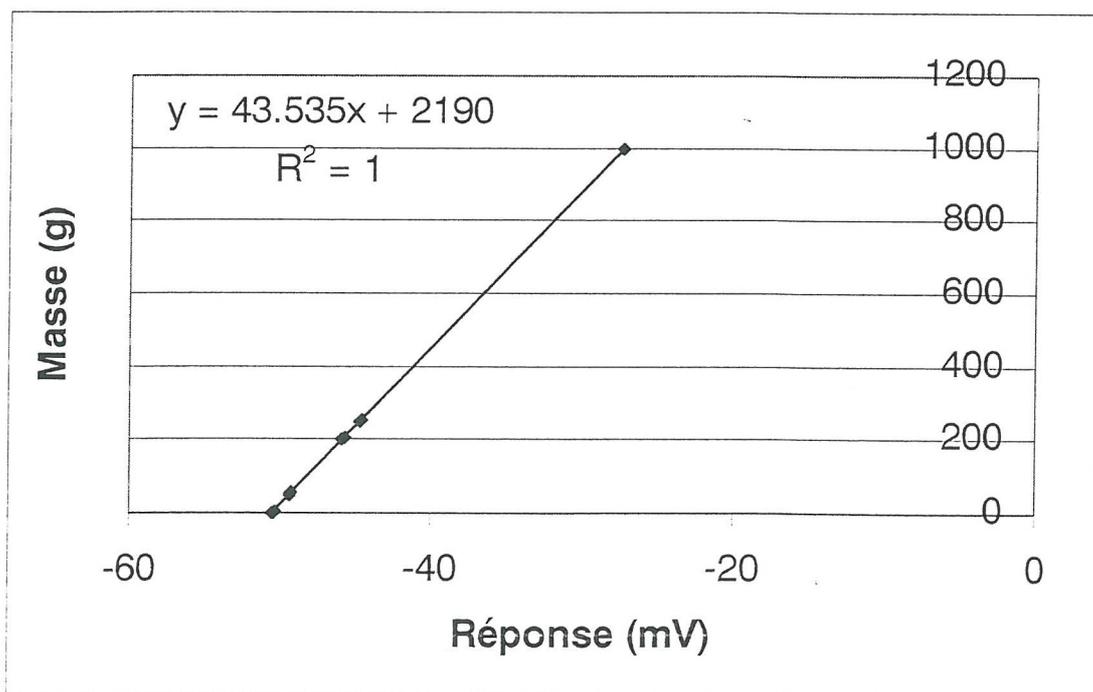


Figure 3b : Etalonnage AG avant expérience – Echantillons S1M1-S1FV1

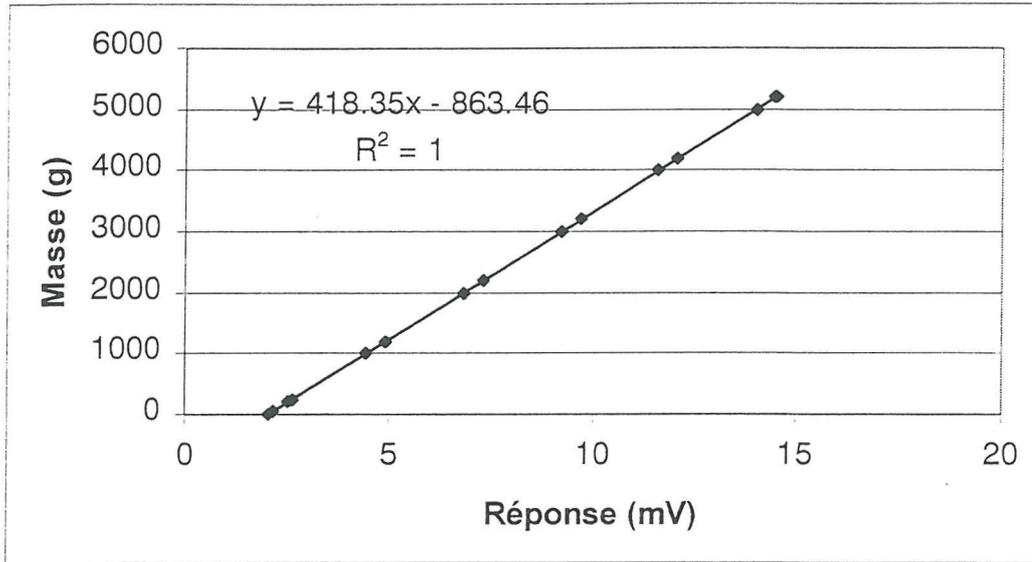


Figure 4a : Etalonnage AL après expérience – Echantillons S1M1-S1FV1

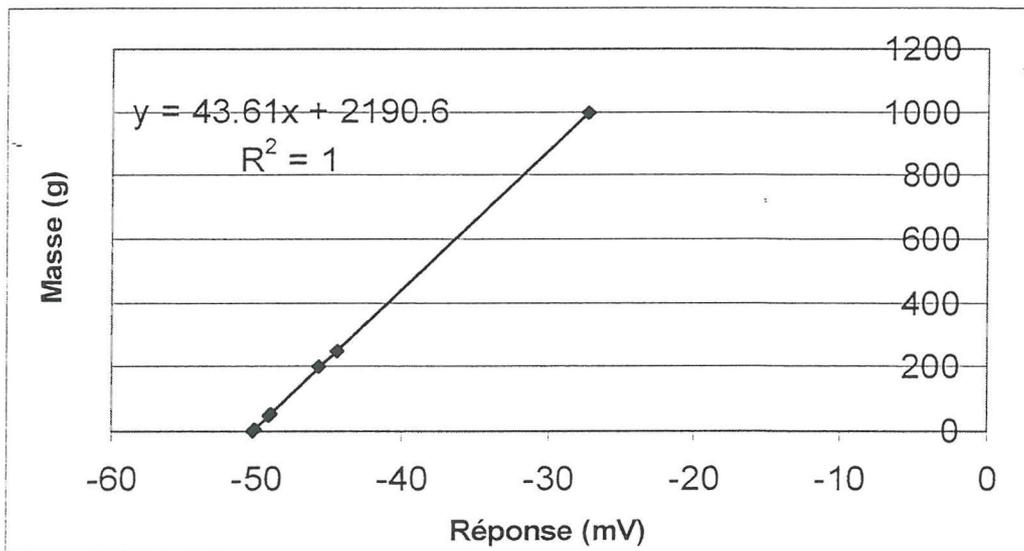


Figure 4b : Etalonnage AG après expérience – Echantillons S1M1-S1FV1

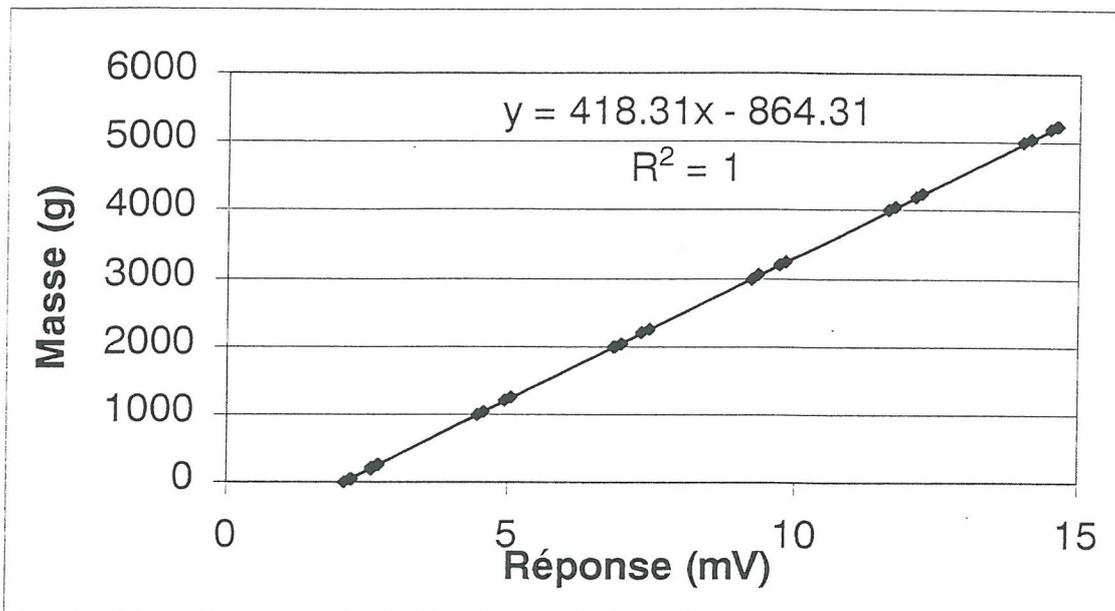


Figure 5a : Etalonnage AL avant expérience – Echantillons LFV2-S1FV2

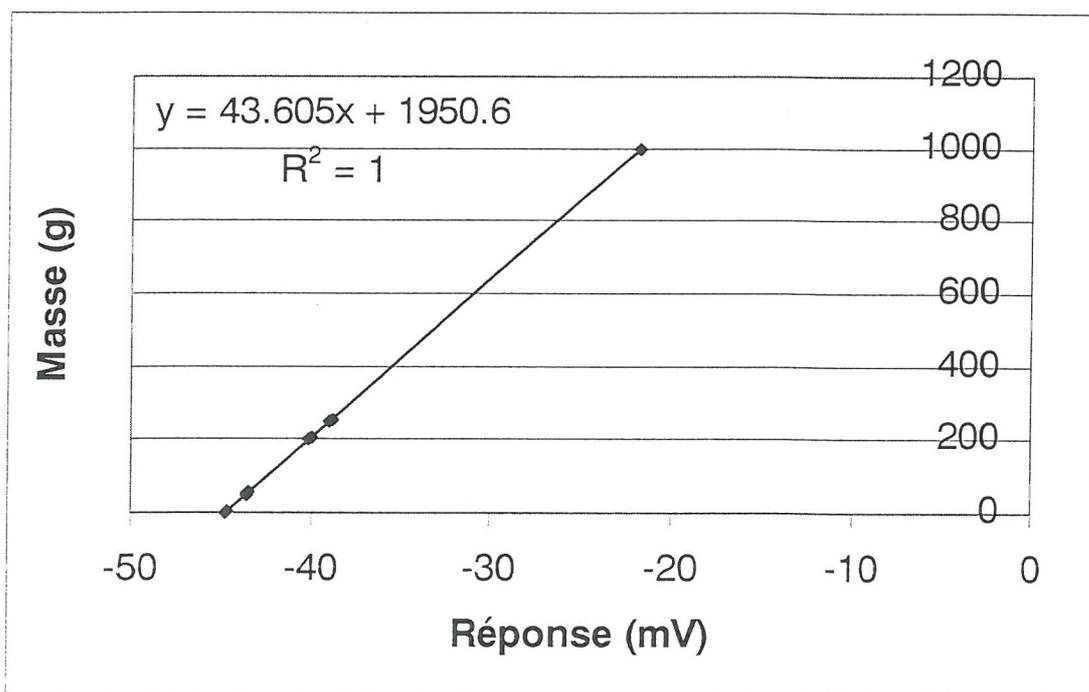


Figure 5b : Etalonnage AG avant expérience – Echantillons LFV2-S1FV2

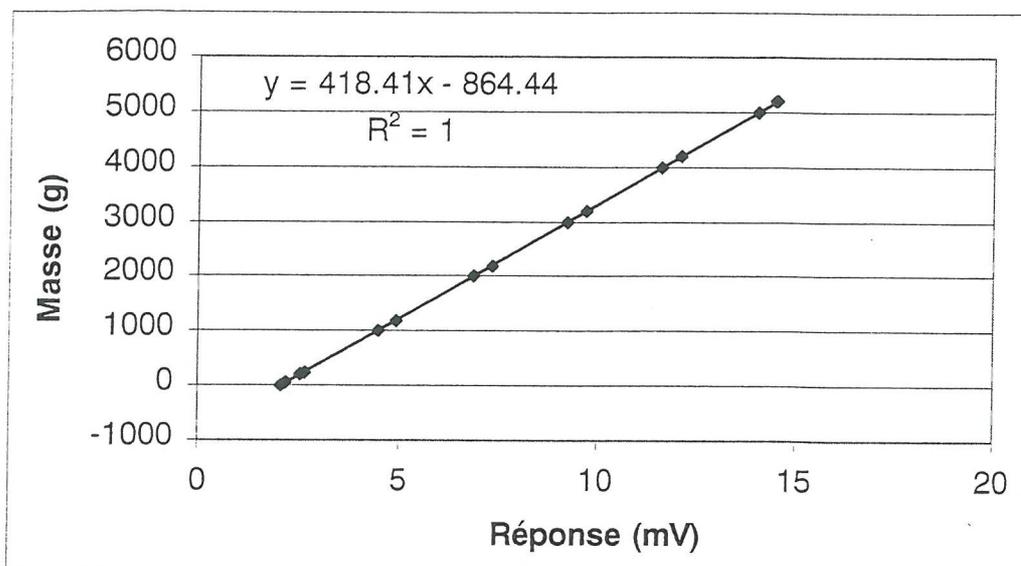


Figure 6a : Etalonnage AL après expérience – Echantillons LfV2-S1fV2

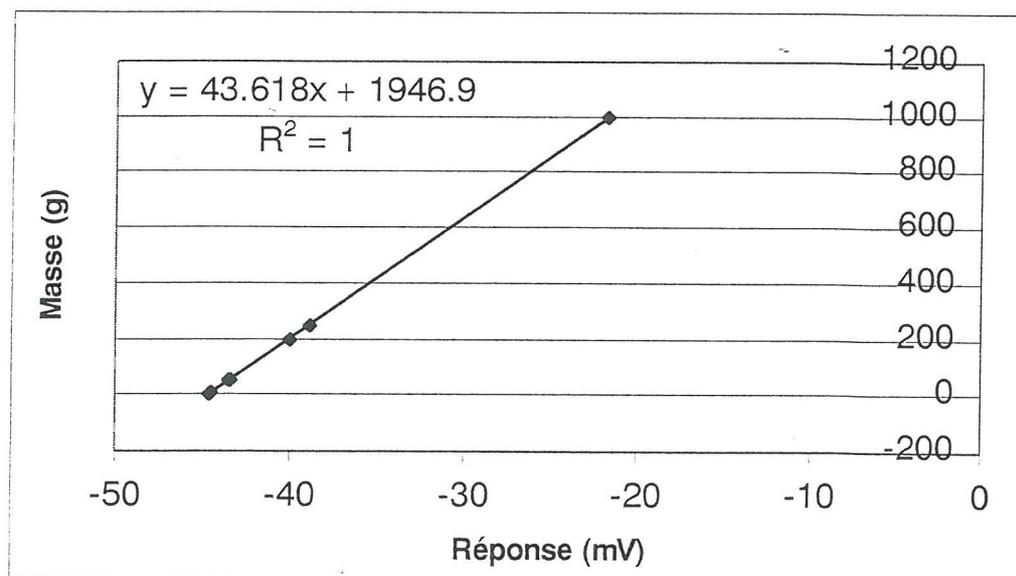
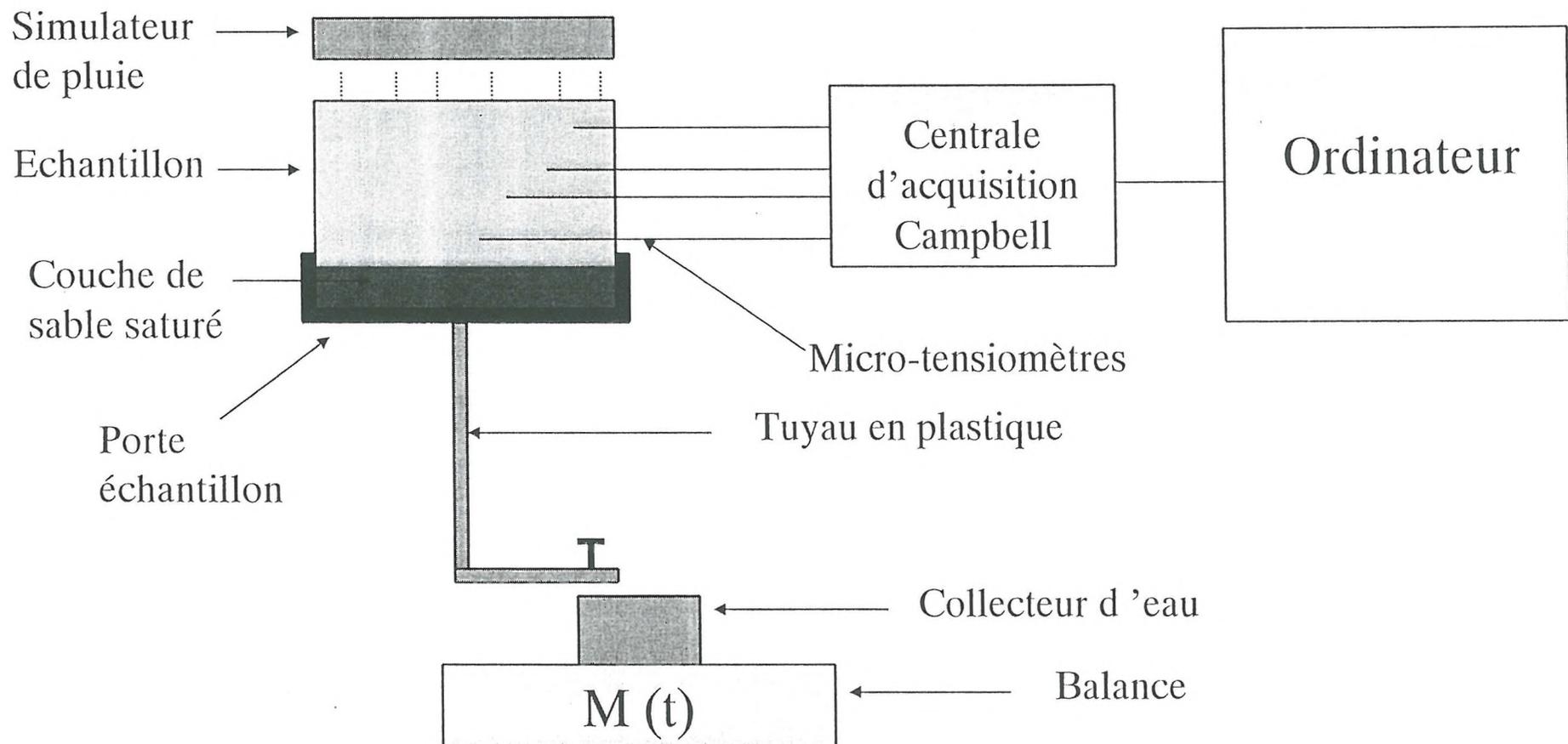
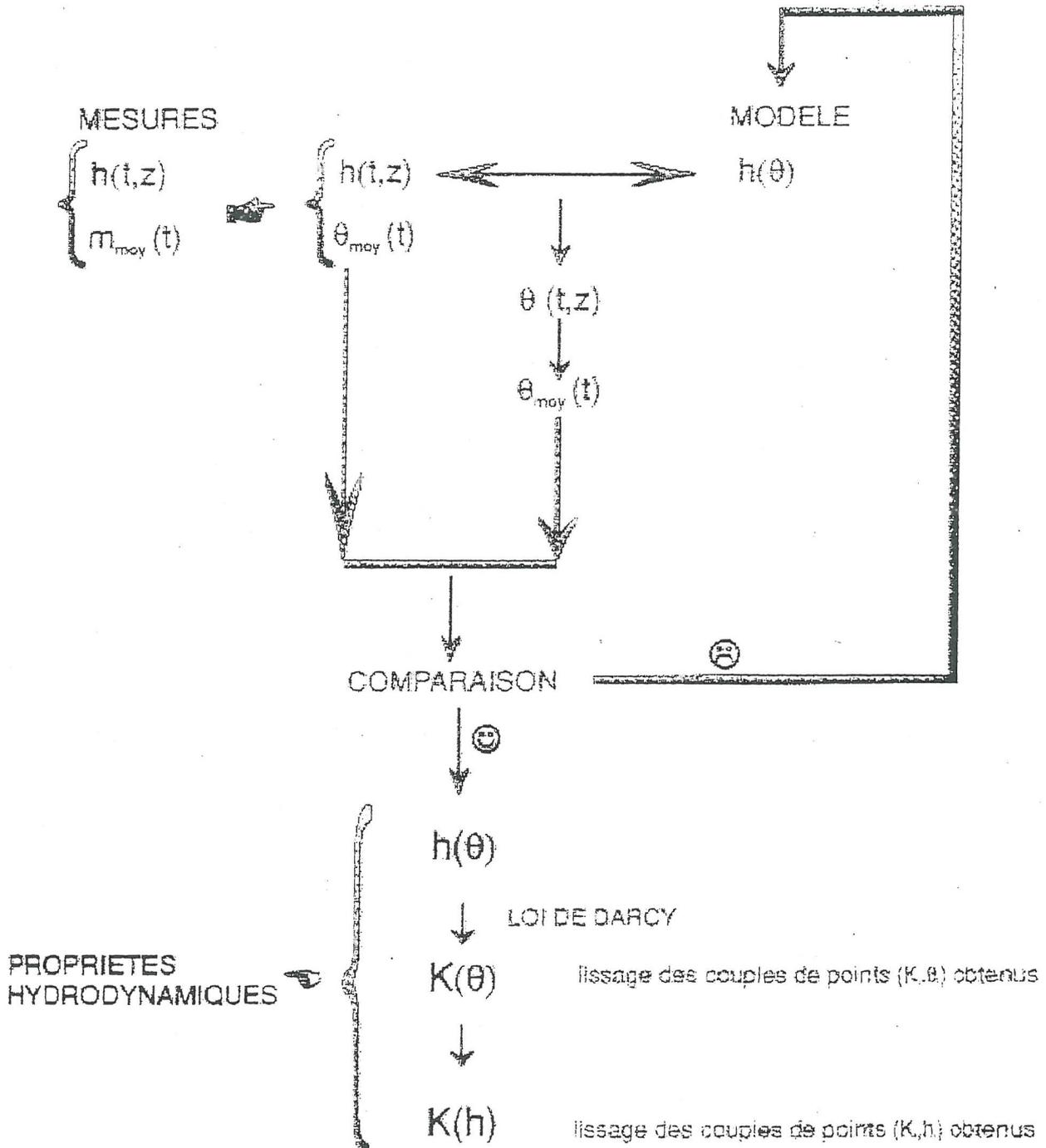


Figure 6b : Etalonnage AG après expérience – Echantillons LfV2-S1fV2

Annexe 4 : Schéma simplifié du dispositif de la méthode DRIP



Annexe 5 : Principe de l'algorithme de Wind



Annexe 6 : Photos du dispositif expérimental Wind

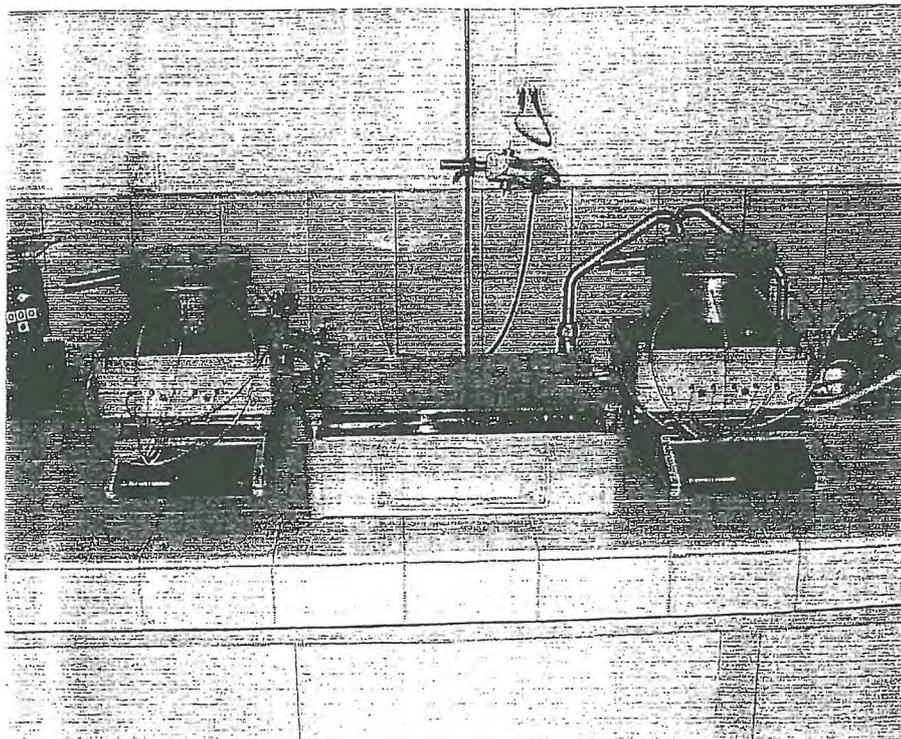


Photo 1 : Dispositif expérimental Wind en évaporation

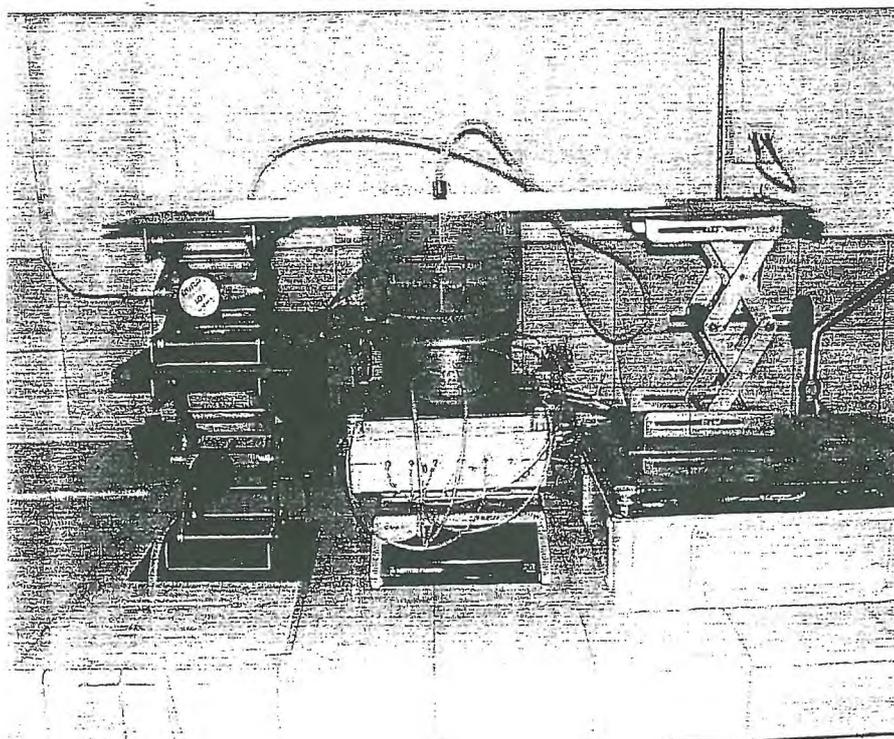


Photo 2 : Dispositif expérimental Wind en infiltration

Annexe 7

Étalonnages des capteurs - Boîtiers C et D

Les capteurs de pression sont des capteurs différentiels mesurant une différence de pression entre la pression atmosphérique (pression de référence) et la pression de l'eau du sol. Ils délivrent un signal en millivolts (mV), qui grâce à un étalonnage préalable, permet de traduire le signal en mètre d'eau. Pour faire l'étalonnage, on applique des pressions connues et on mesure le signal en mV.

La température peut jouer un rôle non négligeable sur la réponse des capteurs. Ses effets sont pris en compte dans l'étalonnage.

1- Procédure d'étalonnage

Les deux boîtiers (C et D), contenant chacun six capteurs et équipés d'un étalon de température, sont placés dans une armoire climatique à température réglable. Ainsi, pour différentes températures (15, 20, 25 et 30 °C), les capteurs sont soumis à des pressions connues (0, 2, 4, 6 et 8 mH₂O) pendant un temps donné (400 secondes) et le signal en mV est mesuré automatiquement par la Campbell (40 mesures, soit une mesure toutes les 10 secondes).

Pour chaque capteur le modèle d'étalonnage utilisé est le suivant :

$$Pot = (\alpha T + \alpha_0).V + (\beta T + \beta_0)$$

avec : Pot : Potentiel matriciel du capteur à la température T en mH₂O
V : Tension mesurée en mV
T : Température du boîtier de capteurs en °C
 α, α_0, β et β_0 : Paramètres d'étalonnage

Pour chaque capteur et à chaque température (T), on ajuste le modèle linéaire :

$$Pot(mH_2O) = a.V(mV) + b$$

On détermine ainsi, pour chaque capteur, une série de deux coefficients (a et b) dépendants de la température. Ensuite on ajuste indépendamment les deux modèles linéaires :

$$a = \alpha T + \alpha_0$$

$$b = \beta T + \beta_0$$

2- Résultats d'étalonnage

Après ajustement de la relation d'étalonnage, les paramètres d'étalonnage pour les deux boîtiers C et D sont résumés respectivement sur le tableau 1 et 2.

Tableau 1 : Récapitulatifs des coefficients α , α_0 , β et β_0 calculés par une régression linéaire effectuée sur les coefficients a et b – Boîtier C

Boîtier C	Capteur 1	Capteur 2	Capteur 3	Capteur 4	Capteur 5	Capteur 6
α (mH2O/mV/°C)	0.000311071	0.000391304	0.000311969	0.000305955	0.000316973	0.000306742
α_0 (mH2O/mV)	0.590522835	0.587577147	0.62285554	0.54946886605	0.588005304	0.571865932
β (mH2O/°C)	-0.001535908	-0.00117268	-0.001574365	-0.001620396	-0.001632072	-0.001403304
β_0 (mH2O)	-0.045564395	-0.093439083	-0.116675291	-0.064447343	-0.100030433	-0.133109373

Tableau 2 : Récapitulatifs des coefficients α , α_0 , β et β_0 calculés par une régression linéaire effectuée sur les coefficients a et b – Boîtier D

Boîtier D	Capteur 1	Capteur 2	Capteur 3	Capteur 4	Capteur 5	Capteur 6
α (mH2O/mV/°C)	0.000316946	0.000255253	0.000299492	0.000355829	0.000182527	0.000326984
α_0 (mH2O/mV)	0.517472977	0.474000815	0.469371766	0.453826657	0.490720949	0.470176531
β (mH2O/°C)	-0.001208212	0.003647451	-0.000841711	-0.001294343	-0.003179791	-0.001119381
β_0 (mH2O)	-0.079544105	-0.24902014	-0.165846188	-0.169248876	-0.068993864	-0.05666704

Les résidus, correspondant à la différence entre la pression théorique calculée à partir des paramètres d'étalonnage et la pression réelle appliquée par l'appareil Druck sont représentés sur les figures 1 et 2 respectivement pour les boîtiers C et D.

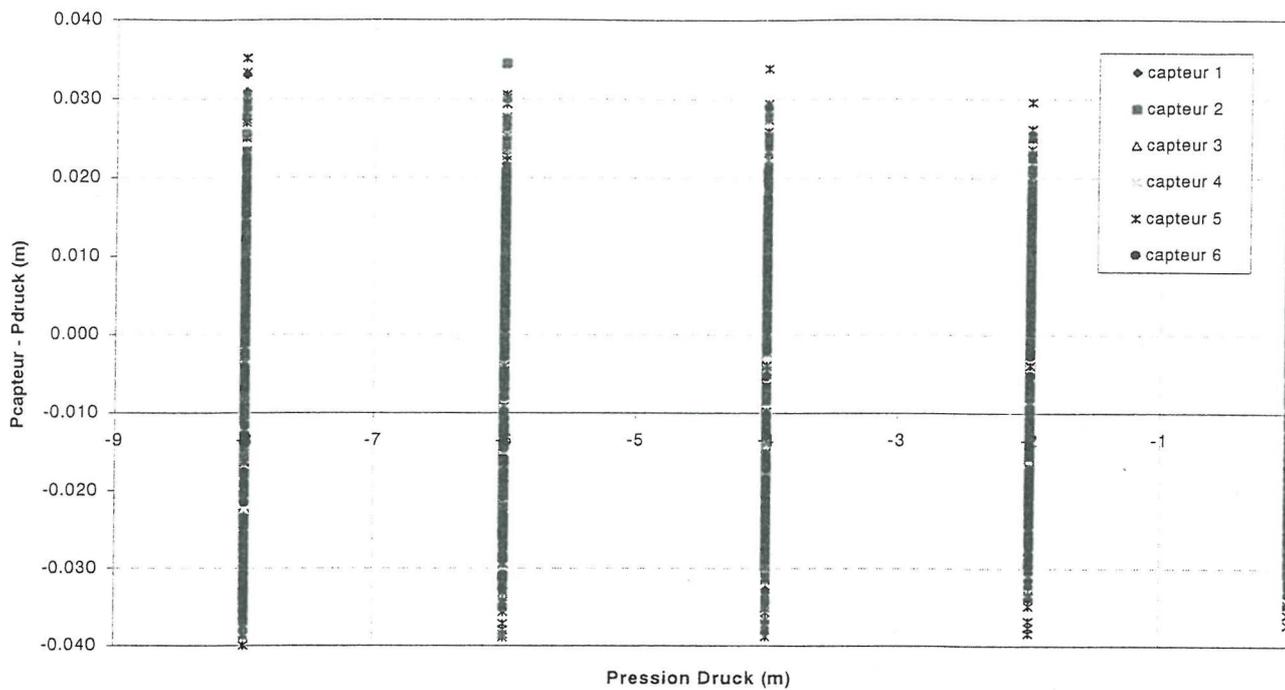


Figure 1 : Résidus pour le Boîtier C

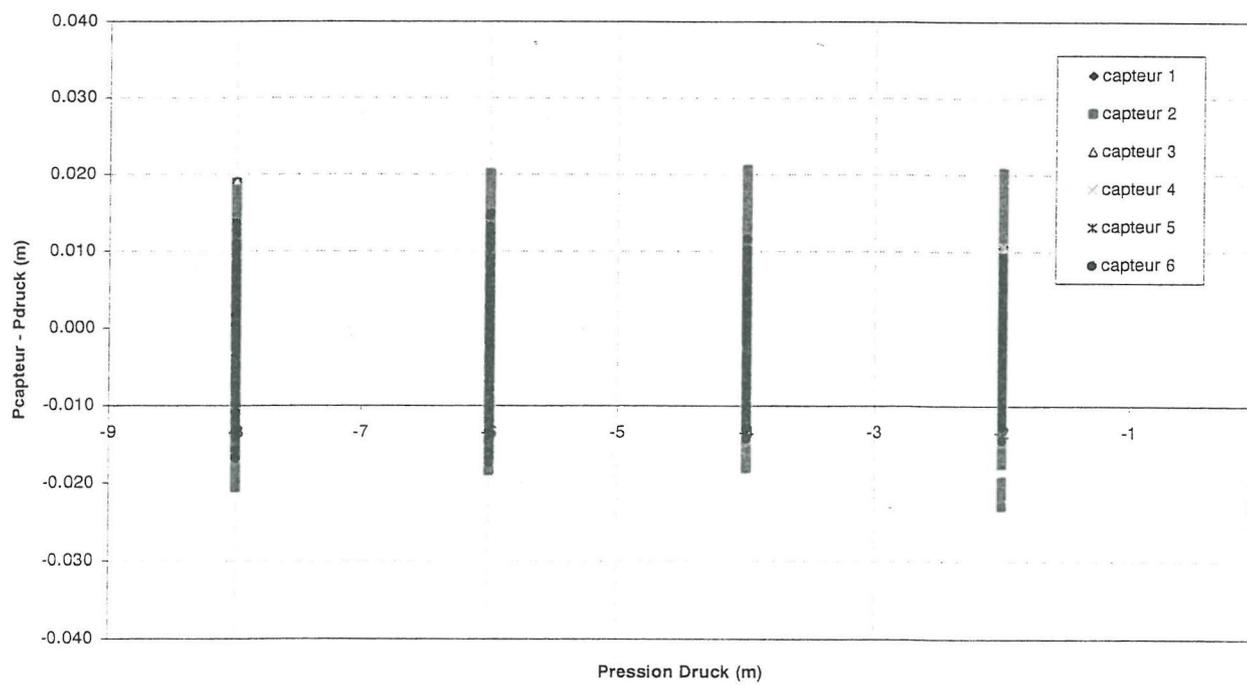


Figure 2 : Résidus pour le Boîtier D

Annexe 8

Relations $\theta(t)$ et $q(t)$ – Expériences des ondes cinématiques

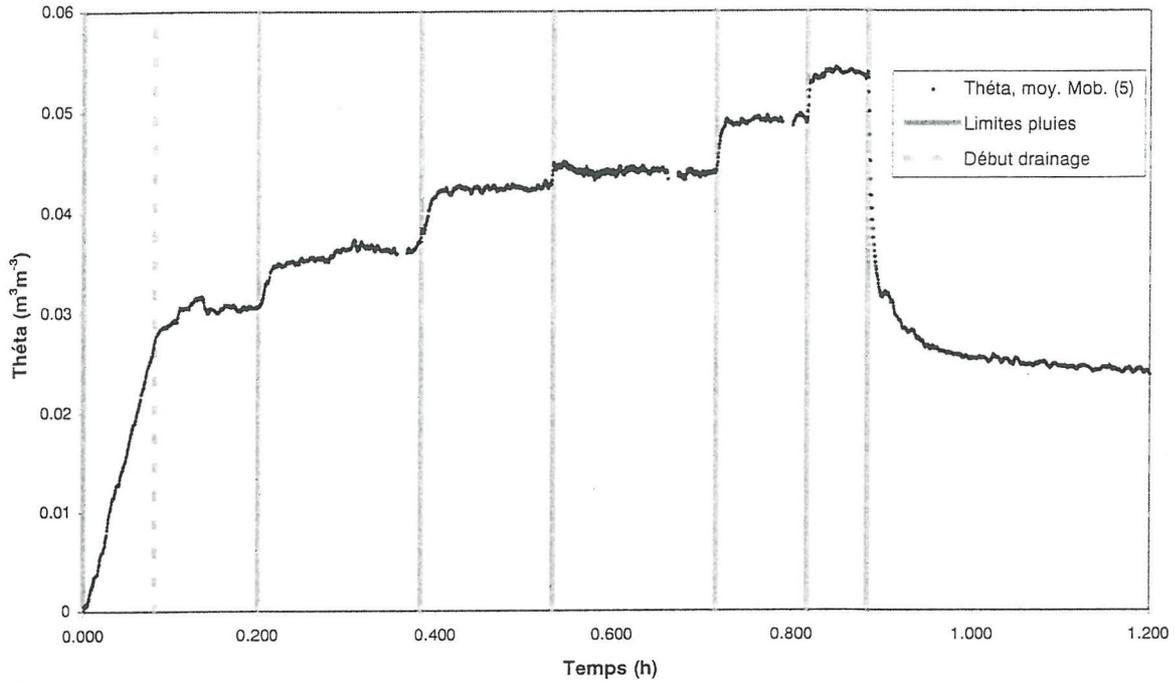


Figure 1a : Relation Théta (t) , moyenne mobile (5) – Echantillon LM1

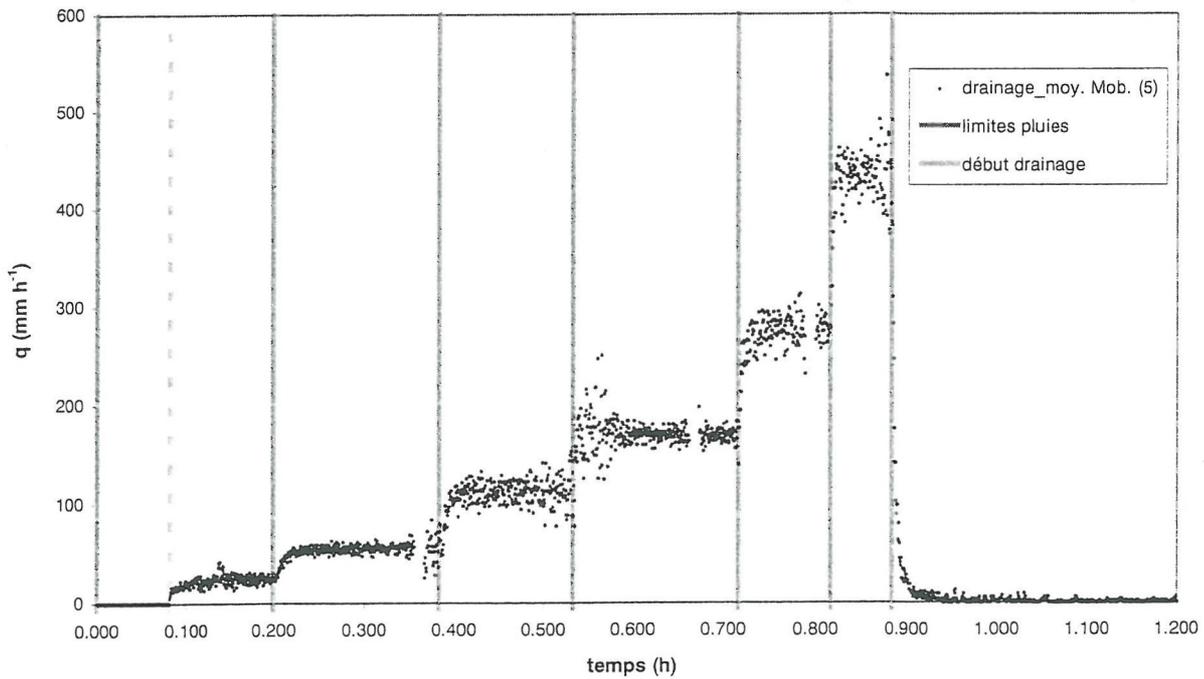


Figure 1b : Relation $q(t)$, moyenne mobile (5) – Echantillon LM1

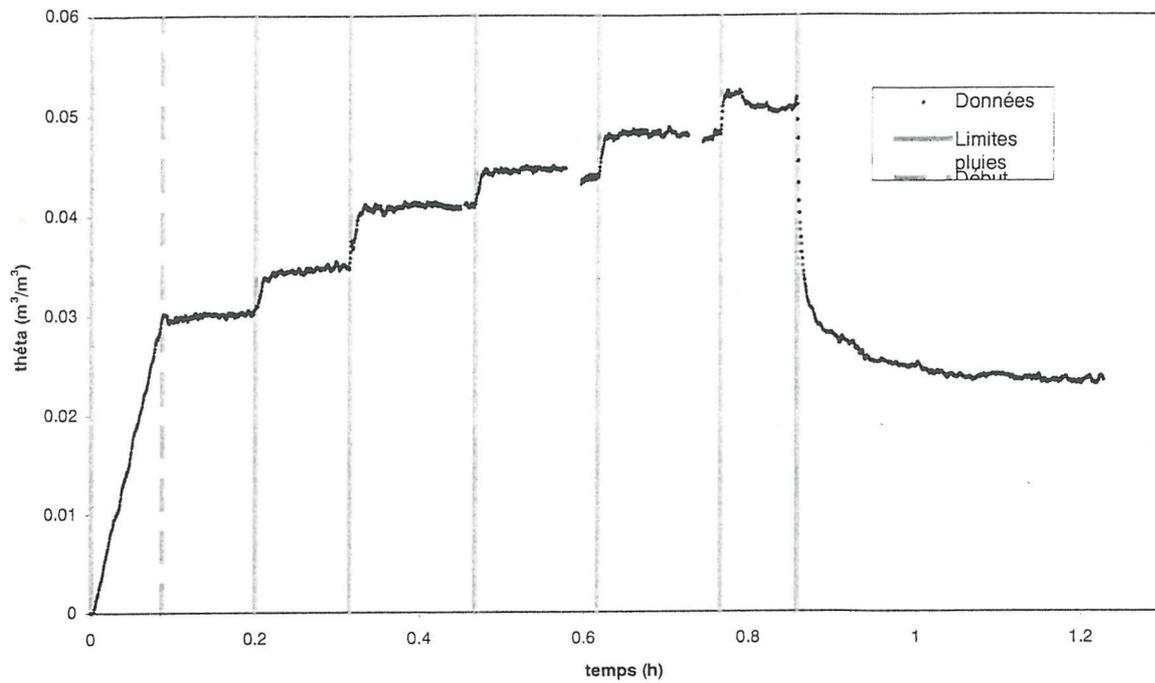


Figure 2a : Relation Théta (t) , moyenne mobile (5) – Echantillon LFV1

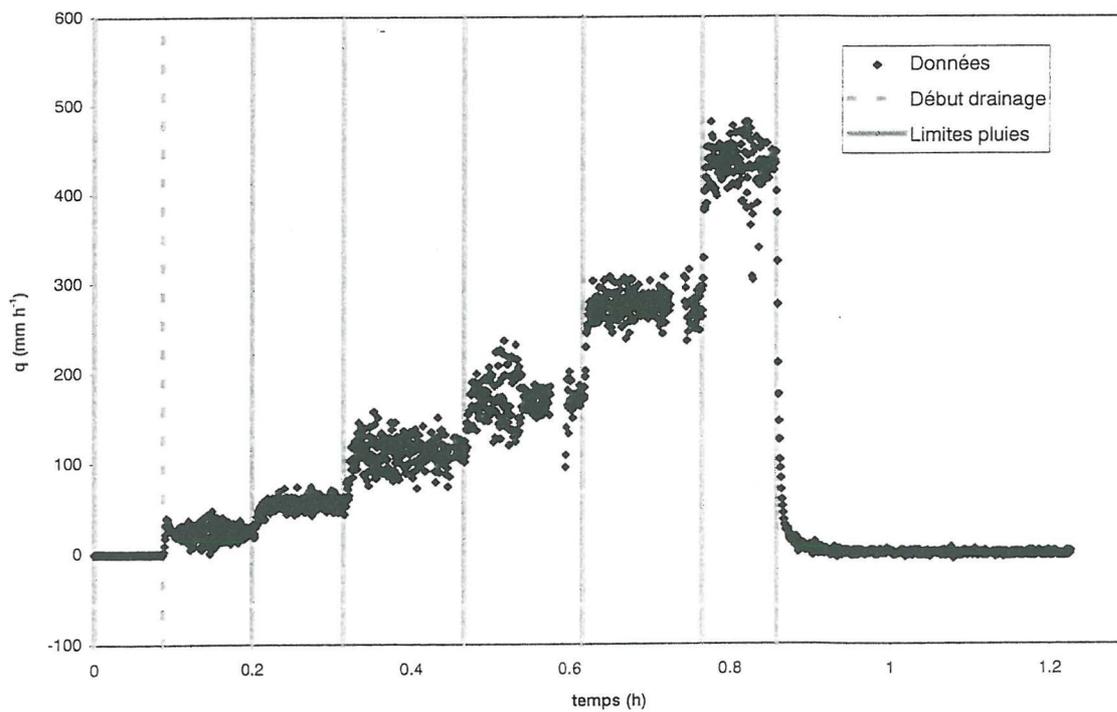


Figure 2b : Relation $q(t)$, moyenne mobile (5) – Echantillon LFV1

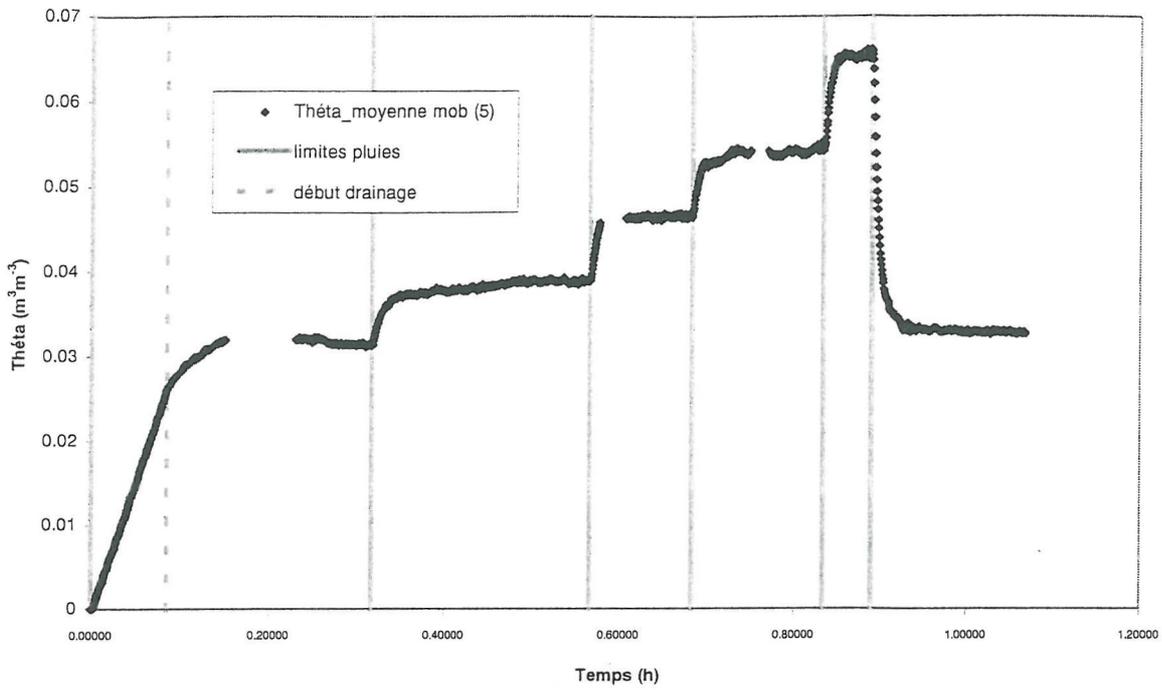


Figure 3a : Relation Théta (t) , moyenne mobile (5) – Echantillon LfV2

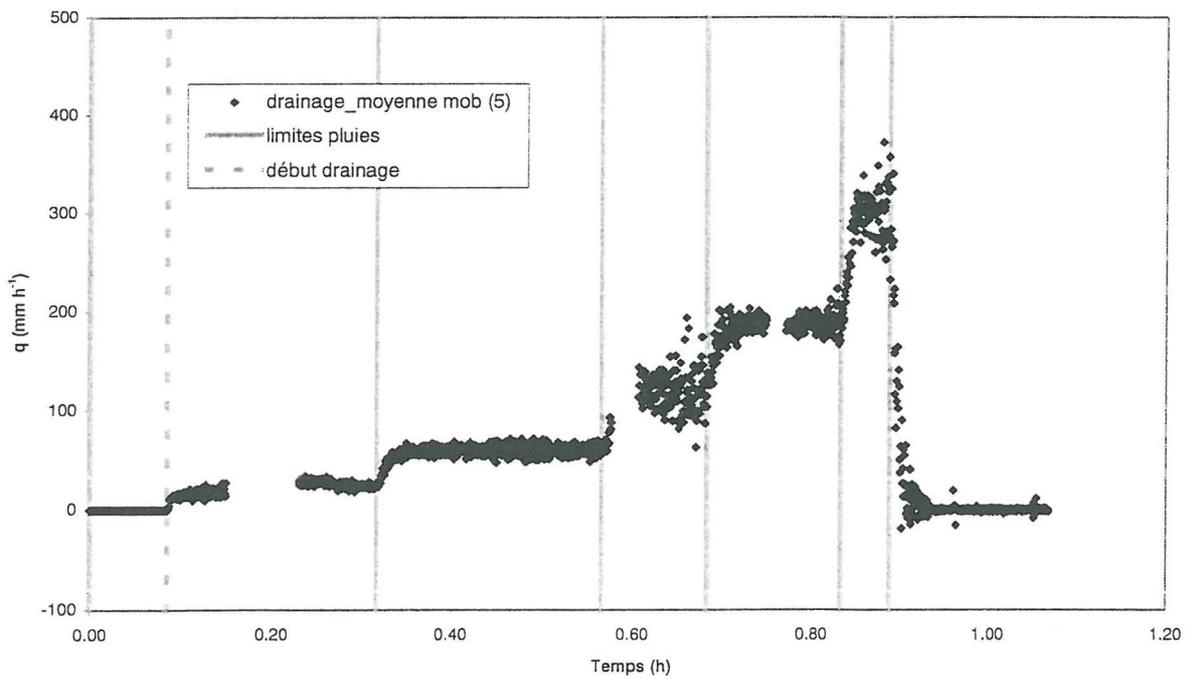


Figure 3b : Relation q(t), moyenne mobile (5) – Echantillon LfV2

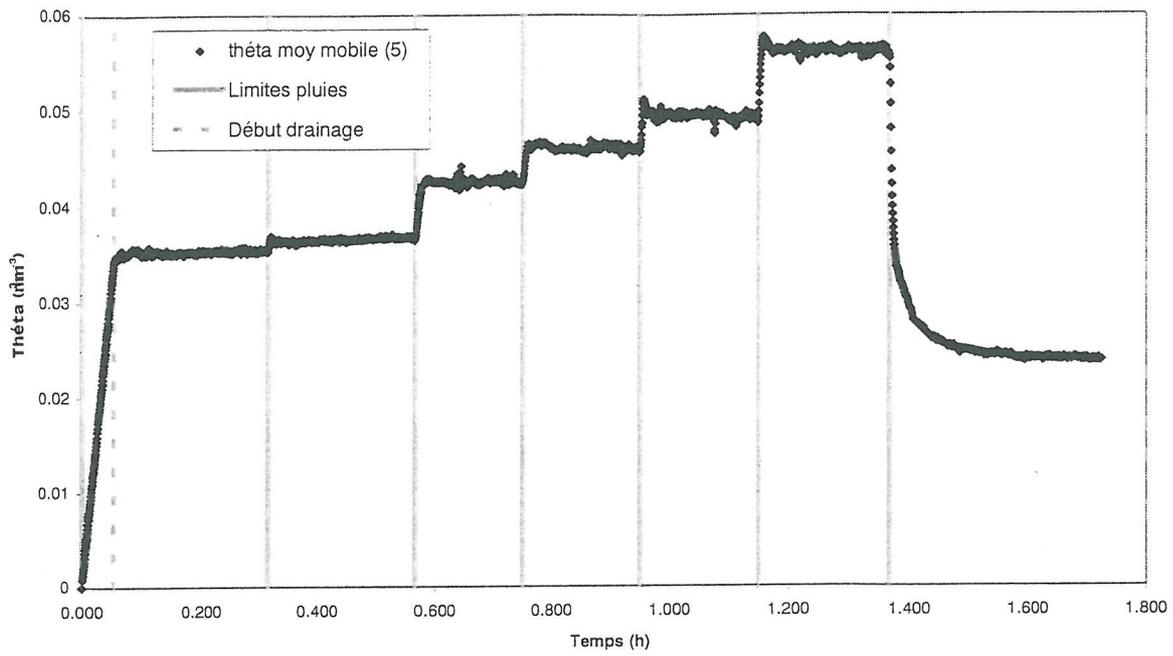


Figure 4a : Relation Théta (t) , moyenne mobile (5) – Echantillon S1FV1

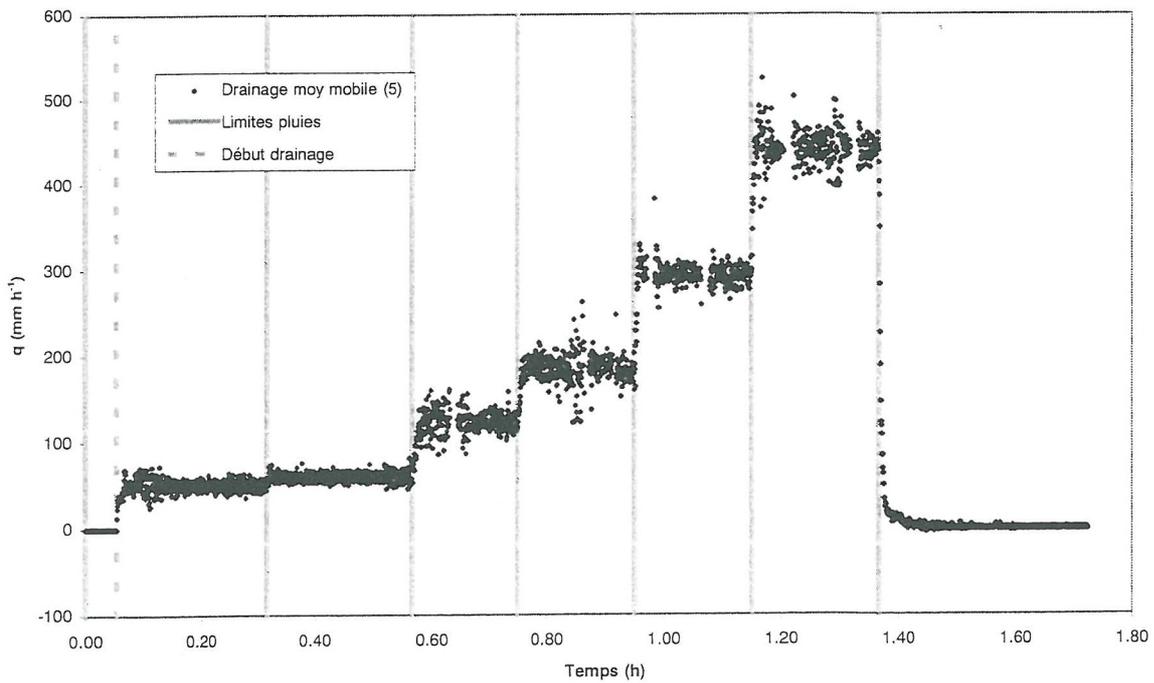


Figure 4b : Relation q(t), moyenne mobile (5) – Echantillon S1FV1

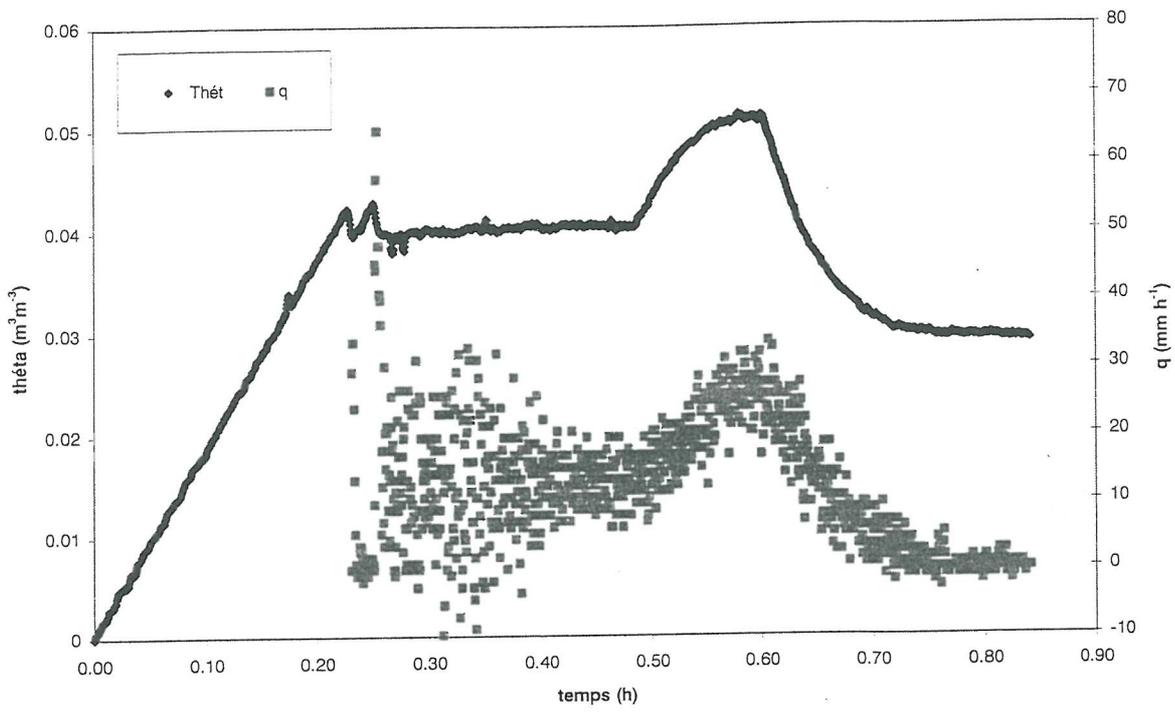


Figure 5 : Relations Théta (t) et q(t), moyenne mobile (5) – Echantillon S1FV2