

Un infiltromètre automatisé pour réaliser les mesures Beerkan

Bernadette Thomas¹

Correspondance

bernadette.thomas@inrae.fr

bernadette.thomas.84460@gmail.com

Résumé.

La conductivité hydraulique d'un sol est un paramètre hydrodynamique qui permet de déterminer la capacité d'infiltration de l'eau dans un sol. Pour déterminer ce paramètre sur le terrain, on réalise manuellement des mesures d'infiltration, dont les essais Beerkan. Cet essai consiste à enfoncer un cylindre de diamètre connu sur 1 cm dans un sol horizontal, à ajouter un volume d'eau connu et à chronométrer le temps d'infiltration. Des volumes d'eau sont ajoutés manuellement jusqu'à obtenir un temps d'infiltration constant. Pendant ce processus, il est important de maintenir un niveau d'eau constant à l'intérieur du cylindre.

Cette méthode présente néanmoins trois limites majeures : 1) le niveau de l'eau varie entre 5-10 mm et 0 mm, il est donc pseudo-constant (et non constant) ; 2) les apports en eau étant manuels, elle mobilise un opérateur par essai pendant toute la mesure qui peut durer plusieurs heures ; enfin, 3) elle comporte un effet opérateur, puisque l'identification de l'instant où tout le volume d'eau s'est infiltré contient une part d'arbitraire.

C'est pourquoi, nous avons conçu, au laboratoire EMMAH (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes), un prototype d'infiltromètre automatisé dans l'objectif de fiabiliser les mesures et d'améliorer le confort de l'opérateur. Cet équipement, qui permet d'ajouter automatiquement un volume d'eau dans le cylindre, de mesurer et d'enregistrer le flux d'eau infiltrée a été validé par les premiers essais terrain.

Mots-clés

Infiltromètre, essai Beerkan, essai Porchet, conductivité hydraulique, paramètres hydrodynamiques

¹ UMR Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes, 84914 Avignon, France.

Bernadette Thomas part à la retraite en 2023, c'est pourquoi nous fournissons, en plus, son adresse mail personnelle.

An automated infiltrometer for Beerkan measurements

Bernadette Thomas¹

Correspondence

bernadette.thomas@inrae.fr

bernadette.thomas.84460@gmail.com

Abstract.

Soil hydraulic conductivity is a hydrodynamic parameter used to determine the infiltration capacity of water in a soil. To determine this parameter in the field, infiltration measurements and Beerkan tests are performed manually. These tests consist in inserting a cylinder with a known diameter into a horizontal soil to 1 cm depth, adding a known volume of water, and timing the infiltration time. Volumes of water are added manually until obtaining a constant infiltration time. It is important during this process to maintain a constant level of water inside the cylinder.

However, this method has three major limitations: 1) the level of water varies between 5-10 mm and 0 mm and is therefore pseudo-constant (non-constant); 2) the manual addition of water requires the attention of an operator per test throughout the measurement, which can take several hours; lastly, 3) it includes an operator effect as the identification of the instant when the entire volume of water has infiltrated comprises an arbitrary element.

Consequently, at the EMMAH laboratory, we have designed a prototype automated infiltrometer in view to ensuring the reliability of the measurements and improving the operator's working conditions. This equipment, which permits automatically adding a volume of water in the cylinder, and measuring and recording the flow of water infiltrated, was validated by the first tests in-the-field.

Keywords

Infiltrometer, Beerkan test, Porchet test, hydraulic conductivity, hydrodynamic parameters.

¹ UMR Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes (, 84914 Avignon, France.

Bernadette Thomas is retiring in 2023, which is why we also provide her personal email address.

Introduction

Le sol est un milieu poreux dans lequel l'eau peut s'infiltrer plus ou moins vite. Pouvoir déterminer cette capacité d'infiltration, ou infiltrabilité, peut être utile dans de nombreuses circonstances comme, par exemple, pour la mise en place d'un système d'irrigation. Ceci nécessite de réaliser des mesures d'infiltrométrie sur le terrain. Plusieurs méthodes sont utilisées à cet effet, dont la méthode simple anneau « Beerkan » (Condappa D., 2000).

La méthode Beerkan, que nous utilisons au laboratoire EMMAH¹, consiste à enfoncer légèrement un cylindre de diamètre variable (compris entre 10 et 100 cm) dans le sol, dans lequel on verse des volumes d'eau élémentaires successifs, de façon à ce que le niveau varie entre une valeur maximale h_0 et une valeur minimale $h_0 - \Delta h$.

Une fois que cette quantité d'eau est infiltrée, on rajoute un nouveau volume d'eau. Ce faisant, le temps d'infiltration est chronométré jusqu'à obtenir un temps d'infiltration constant à quantité égale.

Pendant ce processus, il est important de maintenir un niveau d'eau constant à l'intérieur du cylindre ; or, dans la méthode Beerkan, le niveau d'eau est pseudo-constant : il varie entre 5-10 mm et 0 mm.

À côté de cela, cette méthode présente trois autres inconvénients majeurs :

- elle nécessite des apports manuels d'eau ; l'expérience mobilise ainsi un opérateur par essai pendant toute la durée de la mesure qui peut atteindre plusieurs heures : on doit en effet répéter les mesures pour tenir compte de la variabilité naturelle de l'infiltrabilité d'un sol donné ;
- un effet opérateur peut apparaître, car l'identification de l'instant où tout le volume d'eau s'est infiltré contient une part d'arbitraire ;
- de plus la résolution temporelle, pas de temps entre 2 mesures, n'est pas maîtrisée. Le temps nécessaire pour que s'infiltré 1 volume d'eau peut varier de quelques secondes au début de la manipulation à plusieurs minutes ensuite, ce qui peut impacter la qualité de l'estimation de la conductivité hydraulique du sol à saturation (Di Prima S. et al., 2016).

Afin de s'affranchir de ces limites, nous avons créé au laboratoire EMMAH, le prototype d'infiltromètre automatisé décrit ici. Composé d'une réserve d'eau, d'une électrovanne, d'une sonde et d'un boîtier de commande, il permet d'alimenter le cylindre, en maintenant un niveau d'eau constant, et d'enregistrer automatiquement le temps d'infiltration.

Rappels sur les mesures Beerkan

La méthode de Beerkan (Figure 1) est utilisée sur le terrain pour déterminer les propriétés hydrodynamiques d'un sol. C'est une méthode de type simple anneau. Elle est souvent associée à la méthode BEST (Lassabatère L. et al., 2006) pour traiter les données selon un algorithme complexe, qui permet d'estimer l'ensemble des propriétés hydrodynamiques d'un sol (courbes de rétention et courbes de conductivité hydraulique), dont la conductivité hydraulique du sol saturé.

Des essais d'infiltration d'eau sont réalisés depuis la surface du sol. La surface plane sur laquelle vont se faire les essais doit être débarrassée des cailloux, des débris, et l'herbe doit être coupée ras le sol.

Le cylindre est enfoncé dans le sol sur 1 cm. Plusieurs volumes d'eau connus sont préparés, calculés pour que chaque volume permette d'obtenir un niveau d'eau suffisant au fond du cylindre, de façon à ce que le niveau varie entre une valeur maximale h_0 et une valeur minimale $h_0 - \Delta h$. Δh est égal à h_0 , il est constant et fixé entre 5 et 10 mm. Cette valeur résulte d'un compromis entre une valeur la plus faible possible, pour ne pas s'écarter de l'hypothèse de niveau constant, et une valeur suffisamment grande pour pouvoir mesurer avec précision le temps nécessaire à l'infiltration dans le sol du volume d'eau élémentaire apporté.

La mesure consiste à chronométrer le temps d'infiltration de chaque volume d'eau ajouté, jusqu'à atteindre le régime permanent, c'est-à-dire quand les temps entre deux volumes d'eau ajoutés deviennent identiques.



Figure 1. Mesures Beerkan manuelles

¹ Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes.

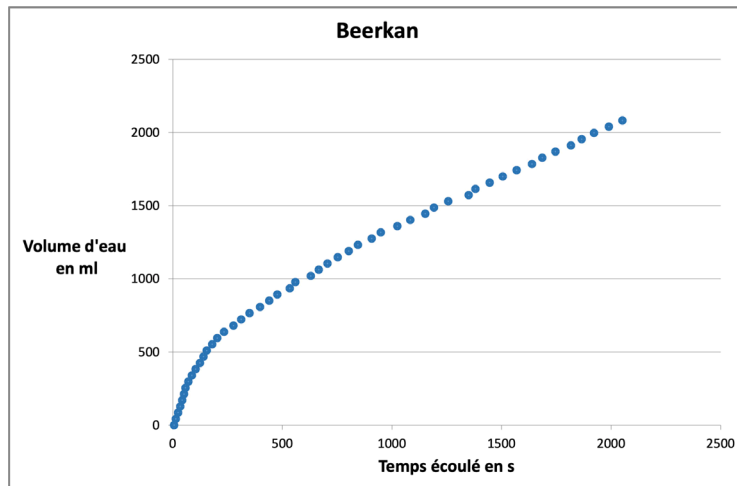


Figure 2. Graphique obtenu avec un essai Beerkan

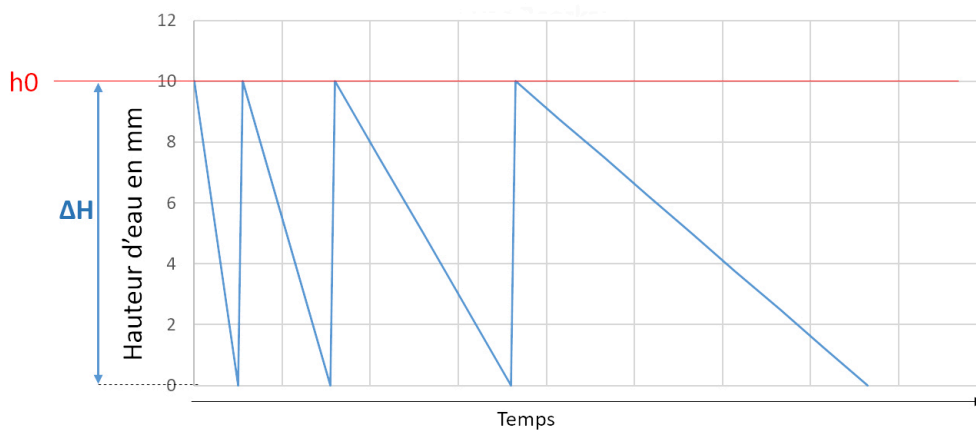


Figure 3. Évolution du niveau d'eau dans le cylindre au cours du temps avec la méthode Beerkan

Au début de l'expérience, l'eau s'infiltrait rapidement. Puis, au fur et à mesure que le sol s'humectait et se saturait, le débit d'eau qui s'infiltrait dans le sol diminuait et tendait à se stabiliser, ce qui définit la fin de l'essai. Un exemple de résultats est obtenu sur la Figure 2 qui représente l'évolution au cours du temps du volume d'eau infiltré. La différence entre les ordonnées de deux points successifs est constante et correspond au volume d'eau élémentaire apporté. La différence entre les abscisses de deux points successifs augmente au cours du temps et représente le temps nécessaire pour que la totalité du volume d'eau élémentaire apporté s'infiltrait dans le sol.

Le ΔH de l'essai Beerkan est égal à h_0 . La Figure 3 représente de façon schématisée l'évolution de la hauteur d'eau dans le cylindre au cours des apports d'eau successifs. Chaque augmentation brusque de la hauteur correspond à l'apport d'un volume d'eau élémentaire par l'opérateur. L'infiltration progressive de l'eau apportée dans le sol est schématisée par une décroissance progressive linéaire. L'eau

s'infiltrait de plus en plus lentement dans le sol, le temps entre 2 apports d'eau augmente ; cela est représenté graphiquement par une pente de décroissance de la hauteur d'eau de moins en moins raide et par des augmentations brusques du niveau de plus en plus espacées.

La durée totale d'une mesure d'infiltrométrie varie entre quelques dizaines de minutes et quelques heures. L'alternative aux apports d'eau élémentaires consiste à mettre en œuvre un dispositif automatique tel que décrit ci-après.

Description de l'outil

L'infiltromètre développé (Figure 4) permet l'automatisation des essais simple anneau de type Beerkan. Sa mise en œuvre est ici décrite dans le cadre de la méthode Beerkan, mais est immédiatement transposable à la méthode Porchet. Cela concerne l'enregistrement des mesures et le maintien d'un

niveau d'eau constant au-dessus du sol, d'une lame d'eau de hauteur constante, mais réglable, et pouvant atteindre plusieurs centimètres.

Dans le cas de l'Infiltromètre automatique, le ΔH est considéré comme limite de régulation du niveau d'eau par l'électrovanne (Figure 5).

Si on compare l'évolution schématique de la hauteur d'eau dans le cylindre entre la méthode Beerkan initiale avec des apports d'eau manuel (Figure 3) et la méthode Beerkan utilisant l'infiltromètre automatique développé (Figure 5), on voit que le niveau d'eau est beaucoup plus stable avec l'infiltromètre automatique, ce qui rapproche les conditions expérimentales du niveau constant requis par les algorithmes de traitement des mesures.

Le kit Infiltromètre contient :

- Un boîtier interface/commande avec l'affichage des 4 dernières mesures.
- Une carte SD.

- Une batterie 12V.
- Une sonde pour les essais Beerkan composée de 2 électrodes pour la détection du niveau d'eau.
- Un capteur de température numérique de précision 1% relié à un câble de 4m.
- Un réservoir et son trépied.
- Un capteur de pression analogique à membrane affleurante, de précision 0,2%, fixé au fond du réservoir.
- Une électrovanne reliée à un câble de 4m.
- Des câbles pour relier le boîtier de commande aux différents éléments.

Au fond du réservoir d'eau, se trouve un capteur de pression qui va mesurer en continu la hauteur d'eau. Ce capteur est relié au boîtier de commande qui va enregistrer toutes ses données. Le capteur de température est positionné à proximité du capteur de pression et relié au boîtier.

Une sortie d'eau en bas du réservoir est reliée à une électrovanne ; c'est une vanne qui, comme un robinet, permet l'écoulement d'eau. Elle nécessite une commande électrique gérée par le boîtier de commande : il y aura ouverture de la

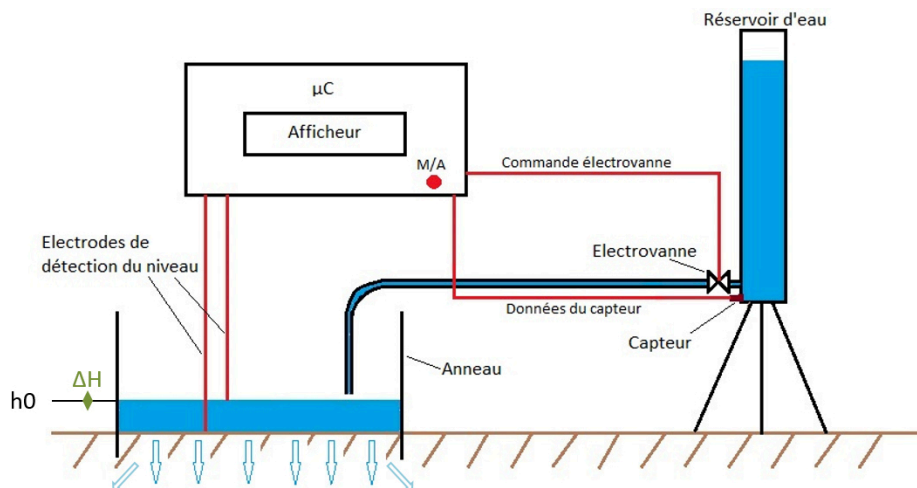


Figure 4. Schéma du système d'infiltrométrie pour un essai simple anneau

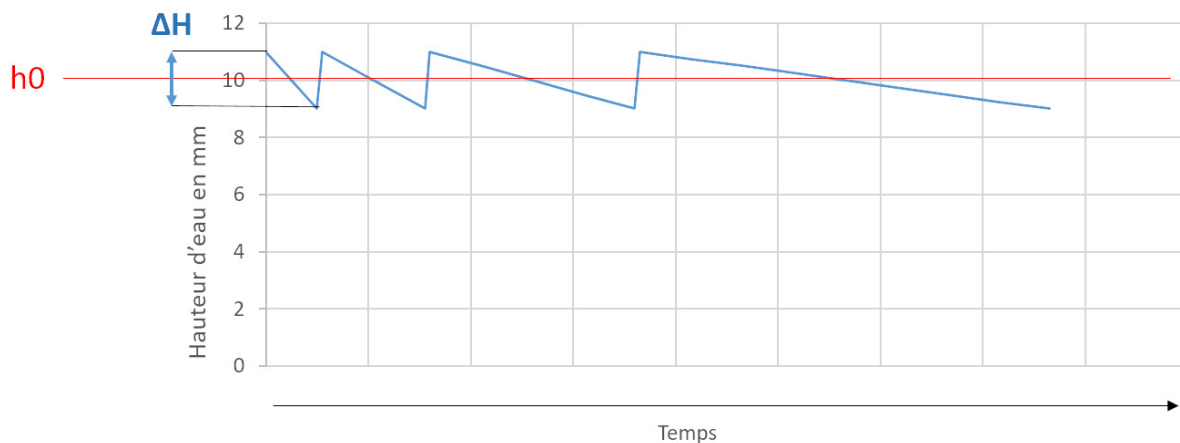


Figure 5. Évolution schématique du niveau d'eau dans le cylindre au cours du temps pour l'Infiltromètre

vanne quand il sera nécessaire d'ajouter de l'eau dans le cylindre. Pour cela, une sonde de détection de niveau d'eau est placée dans le cylindre, elle est reliée au boîtier de commande et permet de commander l'électrovanne.

Le boîtier de commande

Le boîtier de commande est alimenté en 12 V continu et peut donc fonctionner avec une batterie.

- Il permet le paramétrage de l'ensemble.
- Il enregistre, sur une carte SD, les données de paramétrage et l'évolution du flux d'infiltration durant toute l'expérimentation.
- Il commande une électrovanne pour garder constant le niveau d'eau dans le cylindre.
- Un afficheur permet de suivre l'évolution de l'expérimentation et de déterminer le moment d'arrêt de l'essai lorsque le flux d'infiltration devient constant.
- Un bouton « pause » permet de fermer l'électrovanne afin de pouvoir remplir le réservoir ou de modifier les pas de temps d'acquisition.

Un clavier permet de paramétrer l'Infiltromètre, les instruc-

tions sont données sur l'afficheur (Figure 6) après la mise en route.

Le boîtier comprend un microcontrôleur (μC) programmé pour piloter l'ensemble et traiter les données des capteurs de température et de pression ainsi que d'autres composants électroniques, pour répondre au bon fonctionnement de l'ensemble.

Pour répondre au cahier des charges une liste de tous les composants nécessaires a été établie ainsi que leur mode de communication.

Le choix du microcontrôleur (μC) s'est porté sur le Pic-18F46K22 qui permet de communiquer avec tous les composants choisis. Son langage de programmation est le langage C (miKroC). Pour le programmer on utilise un boîtier miKroProg et le logiciel miKroCPro for Pic de MiKroElektronika.

Le boîtier a été conçu de telle sorte qu'il puisse être facilement dépanné et reprogrammé.

La connexion avec les capteurs, la batterie, la sonde et l'électrovanne se fait sur un côté (Figure 7).

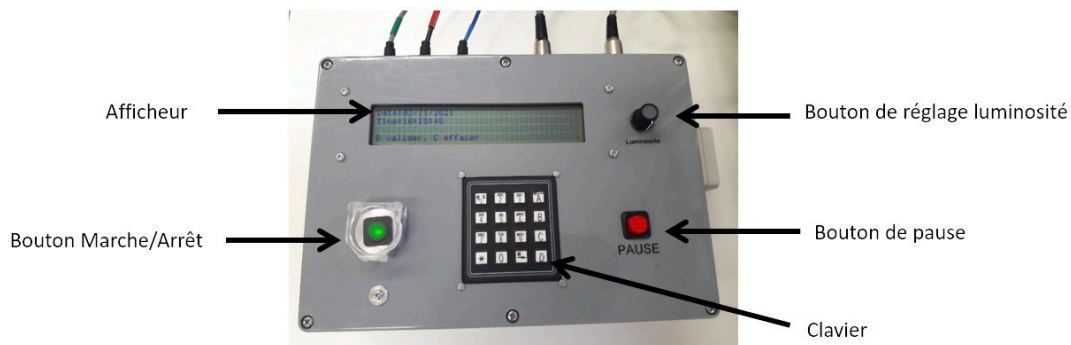


Figure 6. Vue de la face supérieure du boîtier Infiltromètre

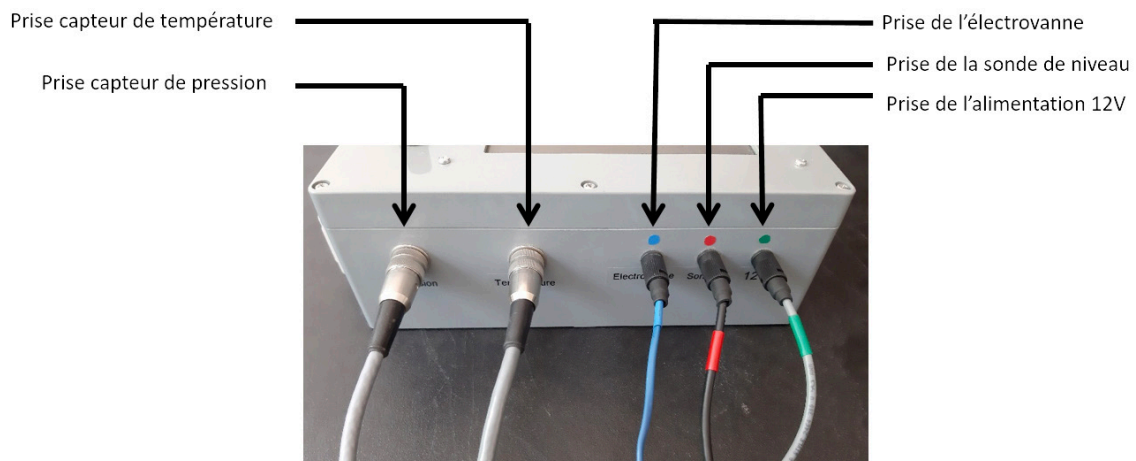


Figure 7. Vue latérale du boîtier Infiltromètre

Mise en fonctionnement de l'infiltromètre automatisé

Mise en place

L'installation du cylindre dans le sol est identique à celle de l'essai Beerkan.

- Prendre soin d'installer le réservoir de l'infiltromètre sur un sol plat.
- Relier les câbles au boîtier.
- Installer la sonde de niveau dans le cylindre ou au fond du trou.
- Connecter le capteur de pression sous le réservoir.
- Fixer la sonde de température sur un pied du trépied qui supporte le réservoir au plus près du capteur de pression.
- Connecter l'électrovanne sur le réservoir, la poser sur un support, son entrée plus basse que la sortie du réservoir, et le tuyau pouvant se vider au-dessus du cylindre.
- Remplir d'eau le réservoir juste au-dessous de la marque interne jaune, ligne de collage d'un manchon adaptateur d'un bouchon à visser. Au-delà le diamètre interne n'est pas identique à la colonne principale.
- Brancher l'alimentation 12 V.
- Mettre en marche le boîtier.
- Suivre les instructions pour le paramétrage (voir le paragraphe suivant).
- **Ne pas démarrer les mesures.**
- Verser la quantité d'eau nécessaire dans le cylindre à l'aide d'un pot gradué pour avoir le niveau d'eau souhaité. Cet apport d'eau manuel en début d'expérimentation est nécessaire afin de passer instantanément à une condition de niveau constant. En effet, le débit transitant par l'électrovanne est

relativement faible et obtenir le niveau constant visé à l'intérieur du cylindre pourrait nécessiter plusieurs dizaines de secondes.

- Démarrer les mesures rapidement.

Paramétrage

Le paramétrage consiste à suivre les instructions indiquées sur l'afficheur. Il faut entrer les informations demandées et valider pour passer à l'instruction suivante.

Le paramétrage permet de :

- Mettre à jour la date et l'heure.
- Donner un nom au fichier d'enregistrement ; à chaque nouvelle expérience un fichier est créé.
- Choisir le diamètre du cylindre.
- Choisir le diamètre du réservoir.
- Choisir les différents pas de temps des mesures.

Toutes ces données sont enregistrées dans un fichier sur la carte SD, que l'on peut ensuite importer et visualiser dans un tableur (Figure 8).

Maintien du niveau d'eau

L'eau étant conductrice, les électrodes de la sonde feront office d'interrupteur. Une des électrodes (+) est une simple pointe de touche extra fine que l'on peut régler pour maintenir une hauteur d'eau de quelques mm à plusieurs cm ; l'autre électrode (-) est la partie métallique qui maintient l'ensemble au centre du cylindre ; elle est toujours en contact avec l'eau.

Lorsque l'électrode + est en contact avec l'eau, le circuit est fermé. Lorsque l'électrode + n'est plus en contact avec l'eau, le circuit est ouvert.

Quand l'eau s'infiltré dans le sol, le niveau d'eau dans le cy-

170221E1.csv 17/02/2021 08:42:21									
Numéro du capteur = 1									
valeur de conversion = 21.59999									
Coefficient a = 0									
Coefficient b = 1									
Coefficient c = 0									
Coefficient d = 0									
Coefficient e = 0									
DeltaT1 = 001 s pendant 001 mn									
puis DeltaT2 = 001 s pendant 001 mn									
et enfin DeltaT3 = 001 s jusqu'à la fin de l'expérience									
Choix du Reservoir = 7 cm									
Choix du cylindre = 7 cm									
Delta T(s)	Numéro mesure	Temps écoulé(s)	I cumulé(mm)	i instantané(mm/s)	i moyen(mm/s)	donnée brute(mm)	donnée corrigée(mm)	T °C	
1	1	1	0	0	0	699	699	22.5	
1	2	2	0	0	0	699	699	22.4	

Figure 8. Visualisation des différents paramètres dans le fichier d'expérimentation stocké sur la carte SD et importable dans un tableur

lindre baisse, le circuit est ouvert. Cette configuration permet, par la conception électronique, d'alimenter en 12 V l'électrovanne normalement fermée afin qu'elle s'ouvre.

Lorsque l'électrovanne s'ouvre, l'eau s'écoule et le niveau dans le réservoir diminue ; la différence de pression est mesurée par le capteur de pression, le niveau d'eau dans le cylindre remonte jusqu'à atteindre l'électrode +, le circuit est fermé, il n'y a plus d'alimentation en 12 V de l'électrovanne, elle se ferme, l'eau ne s'écoule plus et le niveau de l'eau dans le réservoir reste stable.

Du fait de la finesse de la pointe de touche, le ménisque d'eau pouvant se former quand l'électrode + est au contact de l'eau n'est pas visible à l'œil nu, la réponse du système est immédiate. C'est pourquoi le niveau d'eau dans le cylindre est ainsi maintenu à 1 mm près.

Affichage des données

Le microcontrôleur du boîtier de commande récupère les données du capteur de pression. Il calcule la hauteur d'eau dans le cylindre (lcumule en mm) à partir de la mesure de la hauteur d'eau dans le réservoir et des diamètres du réservoir et du cylindre. La différence entre deux mesures successives de lcumule et le temps écoulé entre ces deux mesures va permettre le calcul du flux instantané (instant en mm/s) et du flux moyen (imoyen en mm/s) qui est la moyenne des 5 dernières mesures.

Ces données ainsi que le pas de temps, le temps écoulé et le numéro de la mesure seront affichés sur le boîtier de commande (Figure 9) et enregistrés dans le fichier sur la carte SD (Figure 8).

Quand le sol est saturé, il n'y a plus de variation de flux, le régime devient permanent. La fin de l'expérimentation est visualisable, imoyen ne varie plus.

Un message « Régime permanent atteint » s'affiche si, pen-

dant 5 pas de temps successifs, le flux moyen (imoyen) ne varie pas de plus de 5 % (en + ou en -) de la moyenne des 2 imoyen du pas de temps en cours.

Autre fonctionnalité

Il est possible de faire des pauses pour rajouter de l'eau dans le réservoir ou pour changer les pas de temps au cours d'un essai.

Étalonnage

Cet appareil nécessite l'étalonnage du capteur de pression utilisé pour mesurer l'évolution de la hauteur d'eau dans le réservoir de mesure.

Un petit boîtier est fixé sur le côté droit du boîtier Infiltromètre. Il protège une entrée pour la programmation du microcontrôleur et un bouton pour la mise en étalonnage (Figure 10).

Des capteurs de pression peuvent avoir une dérive en fonction de la température. Ce qui est le cas du capteur de pression que nous utilisons au laboratoire (model 33A-015D). Le capteur de pression utilisé (86-005G-C) pour l'Infiltromètre a un fonctionnement similaire à ce capteur, il a donc été prévu, lors de la conception, une correction en fonction de la température.

Après avoir reçu les capteurs et avant le montage sur le réservoir, le capteur de pression a été vérifié en enceinte climatique. Les différents essais avec plusieurs capteurs ont montré qu'ils n'ont pas de dérive en température dans notre gamme de pression et de température d'utilisation.

Le choix a été de garder le capteur de température afin de pouvoir apporter une correction à des capteurs de pression d'une autre série de fabrication ou d'autres modèles adaptables pouvant avoir une dérive.

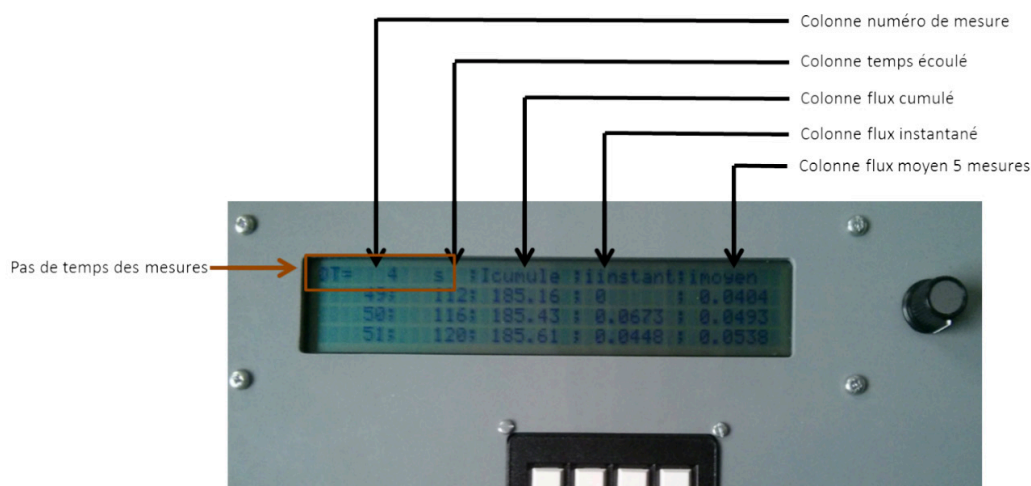


Figure 9. Écran du boîtier infiltromètre

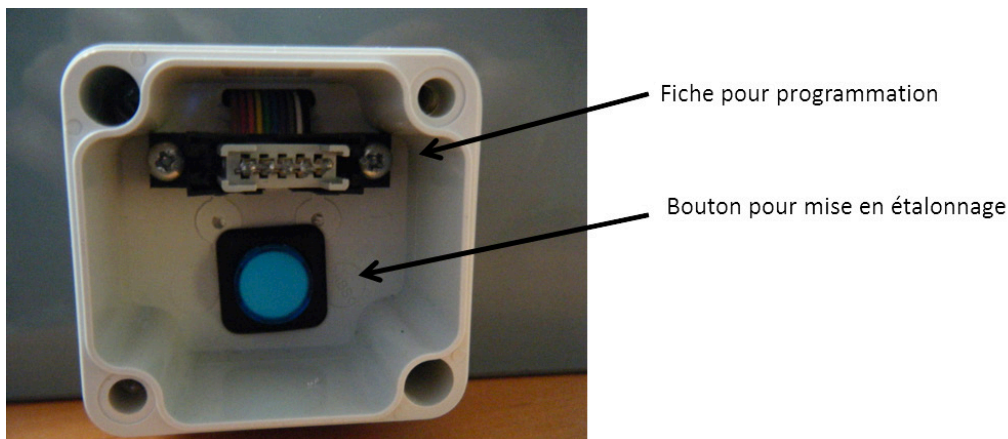


Figure 10. Photo détaillée du boîtier d'étalonnage fixé sur le côté du boîtier infiltromètre

Une fois le capteur monté, l'appareil complet doit être contrôlé. Plusieurs contrôles, décrits ci-après, sont effectués.

- Une première mesure de la hauteur d'eau, quand le réservoir est plein, qui doit être de 702 mm, et lorsque l'eau ne sort plus par l'électrovanne, la mesure doit être de 69 mm. L'information transmise par le capteur de pression est une tension exprimée en mV, elle est convertie dans le programme en hauteur d'eau exprimée en mm par un coefficient multiplicateur nommé « valeur de conversion » qui correspond à la tension en μV qu'il faut pour avoir une hauteur d'eau dans le réservoir de 1 mm. Un fichier de calcul permet d'obtenir cette valeur de conversion. Celle-ci devra être modifiée dans le programme Infiltromètre. Une procédure de modification du programme est disponible pour réaliser cette opération.

- **Contrôle de la dérive en température.** Le réservoir sur lequel est fixé le capteur de pression et le capteur de température sont mis dans l'enceinte climatique pour effectuer des mesures à différentes températures. Il ne doit pas y

avoir de dérive due à la température d'utilisation du matériel. Sur la Figure 11 nous pouvons constater qu'il n'y a aucune dérive de la pression à différentes températures.

- Plusieurs mesures de hauteur d'eau, par ajout d'une quantité d'eau connue, sont ensuite réalisées ; un ajout de 4,5 ml d'eau permet d'avoir une différence de 1 mm, et l'ajout de 45 ml d'eau permet donc d'obtenir une différence de 10 mm.

On ajoute 10 fois 45 ml d'eau puis 10 fois 4,5 ml d'eau, ce qui permet d'obtenir une hauteur d'eau cumulée de 110 mm. On vérifie qu'à chaque ajout la hauteur d'eau indiquée sur l'Infiltromètre correspond à ce qui est attendu (Figure 12).

- **Contrôle du flux.** L'objectif de cette étape est de vérifier que la quantité d'eau qui s'est écoulée hors du réservoir de mesure au cours du temps, calculée à partir des mesures du capteur de pression, est correcte. Ceci se fait en collectant l'eau qui s'écoule dans un récipient posé sur une balance à enregistrement automatique. Une balance de précision

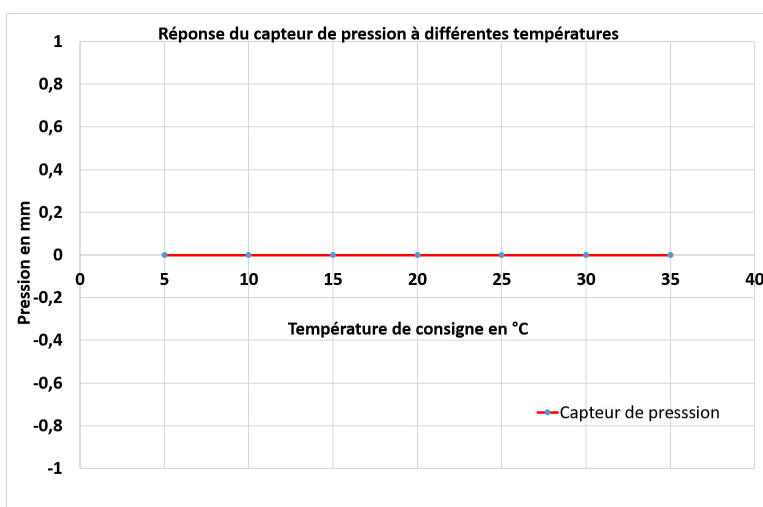


Figure 11. Réponse du capteur à différentes températures

Position étalonnage date : 29/06/2022 Il n'y a ni sonde, ni électrovanne						
Ajout de 10 mm d'eau soit 45 ml			Ajout de 1mm d'eau soit 4,5 ml			
Diamètre colonne 76 mm						
	Ajout en ml	Hauteur indiquée sur infiltro en mm	Différence entre deux mesures en mm	Ajout en ml	Hauteur indiquée sur infiltro en mm	Différence entre deux mesures en mm
		425			525	
	45	435	10	4,5	526	1
	45	445	10	4,5	527	1
	45	455	10	4,5	528	1
	45	465	10	4,5	529	1
	45	475	10	4,5	530	1
	45	485	10	4,5	531	1
	45	495	10	4,5	532	1
	45	505	10	4,5	533	1
	45	515	10	4,5	534	1
	45	525	10	4,5	535	1
Total en mm	100		100	10		10

Figure 12. Ajout d'eau dans la colonne et vérification des données de l'Infiltromètre

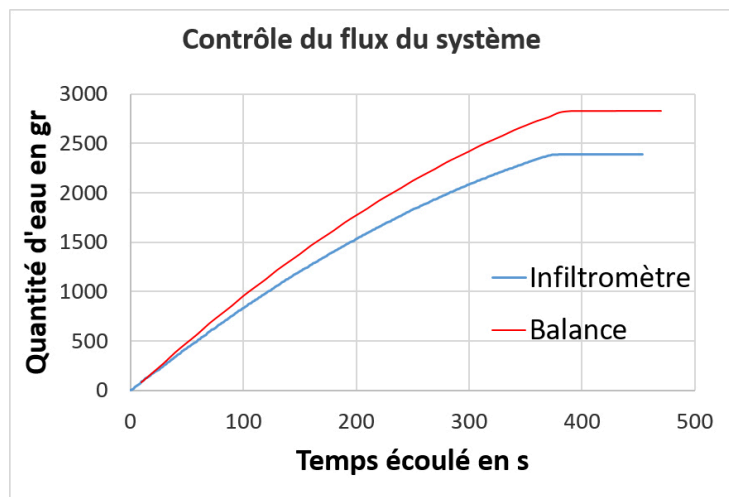


Figure 13. Contrôle du flux avant modification

METTLER (Classe II, Portée max. 6 100 gr, portée min. 50 gr, résolution 0,1 gr) est utilisée ainsi qu'un programme développé en interne sous Labview ,pour acquérir les données de la balance et du temps écoulé.

Les mesures acquises par l'infiltromètre doivent être identiques aux mesures acquises par la balance dont l'EMT est +/-1 gr. Les mesures ont été réalisées avec un pas de temps d'acquisition d'une seconde.

Après plusieurs essais de tests de flux avec une balance, les résultats n'étaient pas ceux attendus (Figure 13).

Il s'est avéré, d'une part, le temps écoulé enregistré par le système électronique développé n'était pas exact. Pour

enregistrer les données sur la carte SD, il est nécessaire d'ajouter des délais dans le code du programme, ces temps n'étaient pas pris en compte par le compteur de temps du programme.

Et d'autre part, le volume d'eau écoulée n'était pas celui pesé par la balance ; le réservoir devait avoir initialement un diamètre interne de 7 cm, or celui utilisé pour la fabrication de l'infiltromètre est de 7,6 cm. Ces informations sont très importantes pour le calcul des flux.

Des modifications dans le programme, délais et diamètre du réservoir pris en compte, ont permis de corriger les erreurs et d'obtenir les résultats attendus (Figure 14).

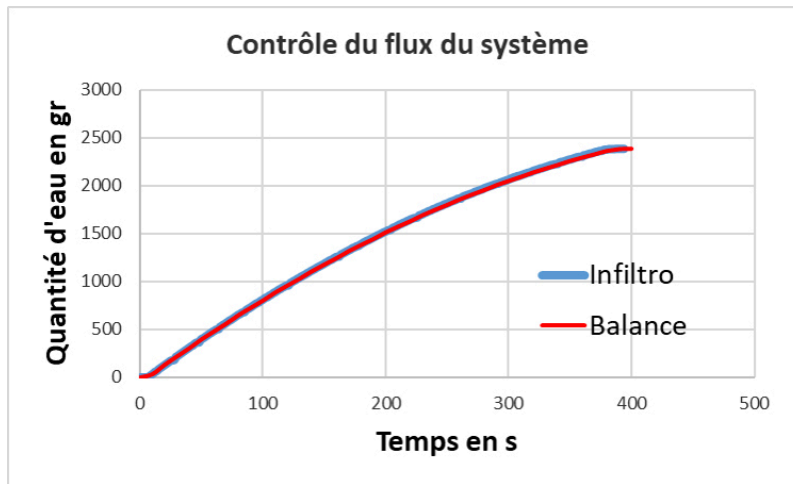


Figure 14. Contrôle du flux qui s'écoule hors du réservoir de mesure. En rouge, la masse d'eau mesurée par la balance de précision, en bleu la masse d'eau calculée par l'infiltrômetre automatique à partir de la mesure du capteur de pression

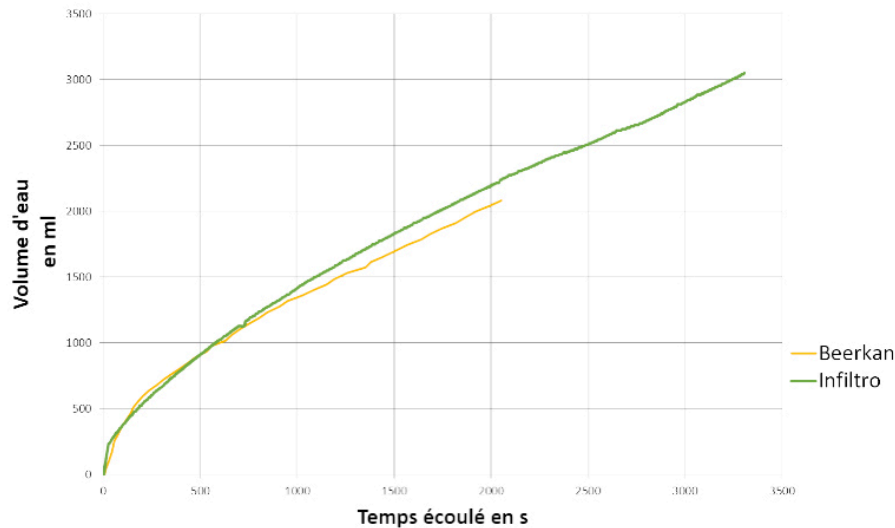


Figure 15. Comparatif entre un essai Beerkan et un essai infiltrômetre à 30 cm de distance

Validation de l'infiltrômetre : les essais terrain

De nombreux essais sur le terrain ont été réalisés pour contrôler le fonctionnement du système hors laboratoire. Il s'est avéré qu'il est difficile de réaliser des comparaisons exactes entre essais Infiltrômetre et essais Beerkan. À deux endroits distants de 30 cm il peut y avoir des écarts, le sol n'étant jamais homogène (Figure 15). Si l'on réalise les deux essais au même endroit, les dynamiques d'infiltration seront différentes car les conditions expérimentales, et en particulier l'état d'humidité initiale du sol, seront différentes.

Nous avons choisi de comparer les résultats en régime permanent de deux essais successifs réalisés sur un même cylindre, le même jour. L'infiltrômetre a été installé de fa-

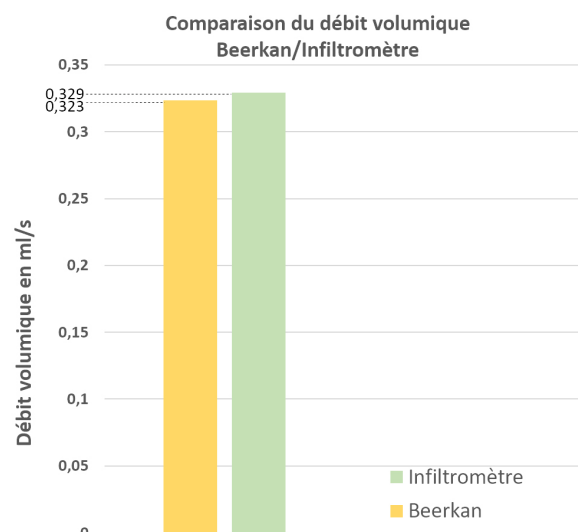


Figure 16. Essai Beerkan suivi d'un essai Infiltrômetre sur un même échantillon

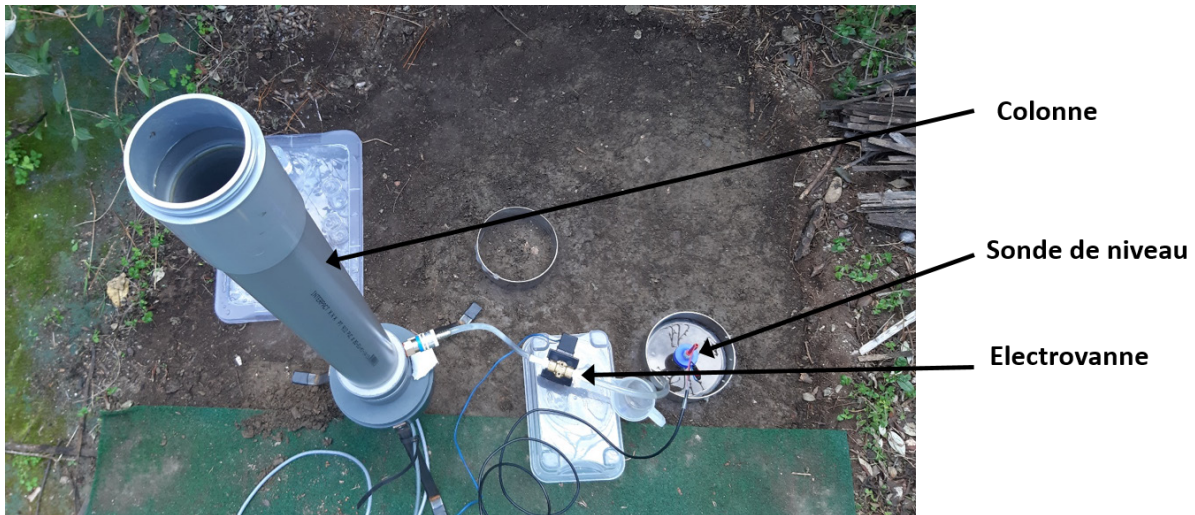


Figure 17. Essai Infiltromètre automatique sur le terrain

çon à pouvoir être démarré immédiatement après l'essai Beerkan, le régime permanent étant atteint. Pour comparer les résultats, il a fallu alors utiliser les données des 200 dernières secondes du fichier Beerkan et les 200 premières secondes des mesures avec l'Infiltromètre (Figure 16). Cette comparaison est concluante et permet de valider l'utilisation sur le terrain de l'infiltromètre automatique (Figure 17).

Conclusion

L'Infiltromètre automatisé que nous avons mis au point permet un apport d'eau automatique, le maintien du niveau d'eau constant à ± 1 mm. Les données nécessaires sont enregistrées dans un fichier .CSV pour pouvoir être traitées. La mise en place du système et son paramétrage demandent une quinzaine de minutes, mais ensuite il ne nécessite qu'une surveillance réduite pour, si besoin, compléter en eau le réservoir. Comme tout développement de prototype, de nombreux essais ont été nécessaires pour obtenir le fonctionnement attendu de l'Infiltromètre. Ces essais ont permis la correction de bugs de programmation mais aussi la mise en place d'une procédure d'étalonnage de l'ensemble, afin de pouvoir obtenir des résultats fiables en expérimentation sur le terrain.

Autre avantage non négligeable de l'utilisation de l'Infiltromètre automatisé est qu'il offre un confort certain pour l'opérateur : ce dernier n'a plus à passer des heures accroupi sur le terrain pour ajouter manuellement les volumes d'eau.

Le dispositif ainsi validé, il s'agit maintenant de vérifier sa robustesse sur le terrain sur le long terme.

Perspectives

Utiliser l'Infiltromètre en laboratoire pour des mesures de Ksat

Au laboratoire nous avons un système pour la mesure de conductivité hydraulique à saturation (Ksat) sur des échantillons. Le dispositif utilisé (perméamètre à charge constante) est chronophage et mobilise un opérateur pendant plusieurs heures pour étudier 2 échantillons en parallèle.

Après avoir réalisé les mesures avec le perméamètre à charge constante, l'Infiltromètre a été branché sur les échantillons de sol afin de comparer les résultats obtenus. Ces résultats sont actuellement en cours de traitement.

Étudier si les paramètres hydrodynamiques du sol sont estimés plus précisément en utilisant l'Infiltromètre automatique et une acquisition de donnée à fréquence rapide (une mesure toutes les secondes) qu'en utilisant des apports d'eau manuels qui impliquent une très faible fréquence d'acquisition de données (une mesure à chaque volume d'eau dont l'infiltration peut prendre quelques secondes à plusieurs minutes, voire dizaines de minutes, pour des sols très peu perméables) ■

Remerciements

Je remercie Stéphane Ruy pour la relecture de cet article et les corrections apportées.

Pour en savoir plus

Une documentation de l'Infiltromètre est disponible au laboratoire EMMAH :

- Manuel du projet
- Manuel utilisateur
- Procédure modification du programme
- Procédure d'étalonnage

Quelques références des matériels utilisés

- Capteur de pression 86-005G-C code Radiospare (RS) : 221-7331
- Microcontrôleur PIC18F46K22 code RS : 715-4488
- Capteur de température I2C Référence : MCP9803-M/MS code RS : 774-7627
- Electrovanne Bobine 14 watt 12Vcc Référence : GDH14012CS chez ODE France
- Afficheur LCD 4X40 caractères Référence : PC4004LRS-A code RS : 215-3617
- Clavier Switch Keypad 16 Key 0.01A 24V Référence : 88BB2 Référence Digi-Key : GH5019-ND
- Horloge de précision NE555P Code RS : 221-5535

Références

Infiltromètre double anneau. Fiche SDEC. France. <https://www.sdec-france.com/ouverturepdf.php?file=brochure-infiltrometre-a-double-anneau.pdf>.

De Condappa, D. (2000). Illustration de la méthode « Beerkan » en vue de la caractérisation hydrodynamique d'un sol. DEA. Grenoble : Université Joseph Fourier-Grenoble.

Di Prima S. et al. (2016). Testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments. Geoderma 262: 20-34.

Lassabatère L, Angulo-Jaramillo R, Soria Ugalde J.M, Cuenca R, Braud I, Haverkamp R (2006). Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. Soil Science Society of America Journal 70: 521-532..



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-SA). <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « NOV'AE », la date de sa publication et son URL.