Mesure de débit sur un lysimètre en milieu agricole à sol non remanié

Franck Tison[1], Jean Claude Gaudu, René Pallut, Stéphane Ruy, Claude Doussan, Liliana Di Piétro

Résumé. Dans cet article, nous décrivons la conception, la réalisation et l'installation d'un système de mesure de débit des flux d'eau à surface libre, sur un lysimètre à sol non remanié implanté sur une parcelle agricole. Le système est composé de deux débitmètres d'architecture différente, destinés à deux gammes de débit correspondant à des intensités de pluie faibles et fortes, et d'un dispositif d'étalonnage. Nous présentons la procédure d'étalonnage et nous étudions la propagation des erreurs sur la mesure. Nous présentons aussi, une première analyse des données obtenues sur un échantillon choisi d'épisodes de « pluie – drainage ». L'objectif de l'installation est de fournir des mesures des flux de drainage de faible à forte intensité et à des pas de temps courts. En particulier, il permet d'estimer la contribution des écoulements préférentiels au drainage suite à des épisodes pluvieux. Le système permet de mesurer la variabilité temporelle du flux de drainage, et de détecter les flux à temps de percée courts. Cet article est destiné aux ingénieurs et techniciens confrontés à cette problématique d'estimation des écoulements.

Mots clés : mesure de débit, lysimètre, drainage, sol non remanié, étalonnage, générateur de débit étalon

Introduction

Contexte général

Les eaux souterraines représentent des ressources en eau importantes largement exploitées pour l'alimentation en eau potable pour les industries, ou pour l'irrigation des cultures. En France, les prélèvements annuels dans les aquifères représentent un volume de 6,32 km^3, soit 19 % des prélèvements totaux (Margat, 2001). Les pratiques agricoles peuvent altérer la qualité des eaux souterraines : les eaux qui percolent dans le sol en dessous de la zone racinaire peuvent entraîner des éléments (nitrates, pesticides, métaux…) qui vont polluer les nappes souterraines. L'élaboration et la mise en œuvre de pratiques agricoles qui minimisent les risques de pollution passent par une meilleure compréhension de l'écoulement de l'eau dans les sols. L'eau s'écoule dans la porosité du sol à des vitesses très variables. On distingue les écoulements rapides dits « préférentiels » dans les pores de grande taille ou macropores (fissures de retrait, anciens passages de racine, trous de vers de terre, porosité créée par le labour…) des écoulements plus lents dans les micropores des sols. Ces écoulements, et leur part relative dans le flux de drainage total, sont encore mal connus et font l'objet de nombreuses recherches (e.g. Bogner, 2004 ; Garel, 2007 ; Chapelet et al., 2012…). Dans le cadre de ces travaux, la mesure directe des différents types de flux de drainage représente un défi technique majeur, la mesure devant porter sur un volume de sol important et être adaptée à une très large gamme de débit.

L'UMR EMMAH (Environnement méditerranéen et modélisation des agro-hydrosystèmes) dispose d'un site atelier, situé sur le Centre INRA - PACA à Avignon, dédié à l'étude et au suivi de la dynamique de l'eau dans les sols et les aquifères. Il est destiné plus particulièrement à la caractérisation et à la prédiction des écoulements préférentiels de l'eau et du transport rapide de composés polluants, en phase liquide et/ou colloïdale, en relation avec les états de surface, la structure du sol et celle de la zone non saturée profonde. Ce site dispose d'un lysimètre de grande taille (longueur : 2,60 m, largeur : 2,00 m et profondeur : 2,40 m) construit autour d'un échantillon de sol non remanié ; il est équipé de deux rangées de drains pour intercepter les eaux s'écoulant (un dispositif à mi-hauteur lié aux écoulements préférentiels et un dispositif au fond du lysimètre donnant le drainage total). Ces

1. INRA, UMR 1114 EMMAH, F-84914 Avignon cedex 9, France
franck.tison@paca.inra.fr

caractéristiques font de ce lysimètre un ouvrage remarquable qui peut être assimilé à un modèle réduit de parcelle. Son instrumentation permanente permet le suivi des produits dans le sol, dans la zone non saturée et de ceux qui devraient rejoindre la nappe, en fonction de l'évolution saisonnière du milieu et des évènements climatiques.

Les attentes et les contraintes

En 2005, les mesures de débit étaient exécutées manuellement, par deux expérimentateurs. Il était nécessaire d'automatiser ces mesures et leur enregistrement sur les deux rangées de drains de façon à prendre en compte tous les évènements pluvieux. Les gammes de mesure des deux débitmètres à concevoir étaient de 0 à 150 L/h pour les drains supérieurs et de 0 à 450 L/h pour les drains inférieurs, avec la nécessité de détecter le début des écoulements et de les enregistrer tout au long de l'épisode de drainage. Enfin, comme tout appareil de mesure, un dispositif d'étalonnage devait permettre la vérification et le calibrage des instruments.

Etat de l'art

Aucun dispositif industriel ne permettait de mesurer les débits sortants sur les deux séries de drains du lysimètre. Il était donc nécessaire de concevoir deux instruments capables de réagir à un petit volume d'eau pour mesurer le plus finement possible de petits débits.

Cependant, il existe de nombreux types de débitmètre industriel : les débitmètres volumiques laminaires, débitmètres à flotteur, débitmètres à turbine, débitmètres à engrenage sont des instruments qui permettent des mesures de débit volumique ; les débitmètres à ultra son, débitmètres massiques laminaires, débitmètres électromagnétiques, débitmètres massiques thermiques, débitmètres massiques Coriolis sont des instruments qui permettent des mesures de débit massiques. Les uns comme les autres nécessitent une canalisation en eau pour réaliser une mesure fiable.

D'autres méthodes et dispositifs permettent la mesure de débit en surface libre. Le seuil jaugeur, le déversoir et le canal venturi sont basés sur le même principe : une section artificielle est implantée dans l'écoulement. Cela permet d'obtenir un régime critique où le débit est en relation avec la hauteur d'eau au-dessus du seuil. Ces dispositifs sont adaptés pour la mesure de débit sur des cours d'eau. La mesure au voisinage du zéro n'est pas possible.

La méthode électromagnétique, basée sur le principe de Faraday, consiste à implanter dans l'écoulement une bobine d'induction pour renforcer le champ magnétique et deux électrodes de chaque côté de l'écoulement d'eau. Cette méthode, adaptée à des mesures de débit sur des canaux, rivières, est relativement imprécise, et n'est donc pas adaptée pour le lysimètre.

La méthode volumique consiste à recueillir dans un récipient un volume d'eau pendant un temps donné. Cette méthode, qui est relativement simple à mettre en œuvre est la méthode que nous avons choisie et que nous avons automatisée.

Solutions choisies

Les solutions proposées et mises en œuvre sont les suivantes :

✓ débitmètre 150 L/h : le principe consiste en l'utilisation d'une bouteille où une fuite calibrée est aménagée. Cette bouteille est installée sur une balance électronique équipée de jauges de contrainte KERN (DE 60K5N), et un auget basculeur d'une capacité de 20 g comptabilise le volume d'eau évacué par la fuite. L'électronique embarquée mesure le temps entre deux basculements d'auget, et lit la mesure de masse sur la balance. Un ordinateur interroge régulièrement l'électronique embarquée pour sauvegarder les mesures sur le disque dur de l'ordinateur ;

✓ débitmètre 450 L/h : l'objectif est l'extension de la plage de mesure. La bouteille limitant la durée de fonctionnement à pleine échelle est supprimée. Nous avons fait le choix de mettre en cascade plusieurs augets basculants, de taille croissante pour mesurer le débit du flux d'eau qui circule dans l'appareil, en le divisant par gamme de débit. L'électronique embarquée mesure la période entre chaque basculement. Le même ordinateur interroge l'électronique embarquée pour sauvegarder les mesures sur le disque dur.

Description du lysimètre

Un lysimètre est un dispositif qui permet d'étudier les interactions entre l'eau, le sol et les plantes. Il est classiquement utilisé pour estimer l'évapotranspiration par mesure (i) de la pluie incidente, (ii) du drainage et (iii) de la teneur en eau du profil de sol ou en pesant le bloc de sol. Le lysimètre de l'UMR EMMAH d'Avignon n'est pas pesable. C'est un ouvrage en béton d'une longueur de 2,60 m et d'une largeur de 2,00 m sur une hauteur de 2,40 m (**Figures 1 et 2**). Il a été construit autour d'un échantillon de sol non remanié pour ne pas perturber la structure du sol en relation avec l'étude des écoulements préférentiels, ce qui est sa principale caractéristique. La base du lysimètre est isolée de la nappe par une série de palplanches en PVC. Trente-quatre drains, disposés en deux séries, ont été installés pour collecter les eaux de drainage.

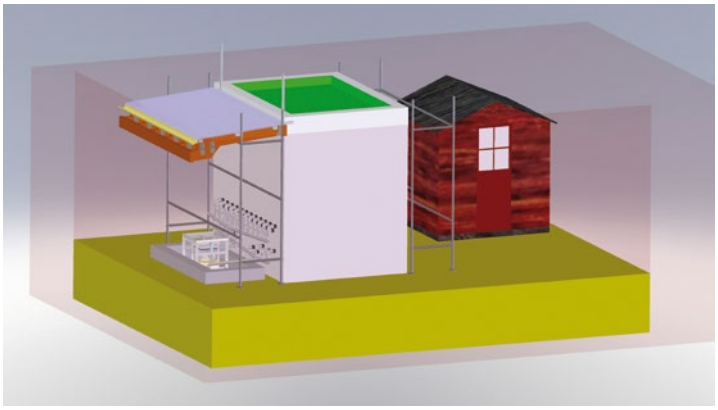

Figure 1. *Schéma général du lysimètre.*

Figure 2. *Photographie de la façade ouest du lysimètre (photo : EMMAH).*

La vue synthétique sur la **Figure 3** permet de découvrir la structure interne de l'ouvrage. Une structure mécanosoudée en IPN rigidifie l'ensemble de l'ouvrage. Quatre murs en béton projeté maintiennent le monolithe de sol à sa place. Une géo-membrane en PVC isole le sol du béton. Des palplanches interceptent le flux d'eau qu'une série de drains évacue vers l'extérieur. Une autre série de drains placés au-dessus des premiers est prévue pour intercepter les flux préférentiels (**Figure 4**). Une paire de collecteurs achemine les eaux drainées vers les débitmètres.

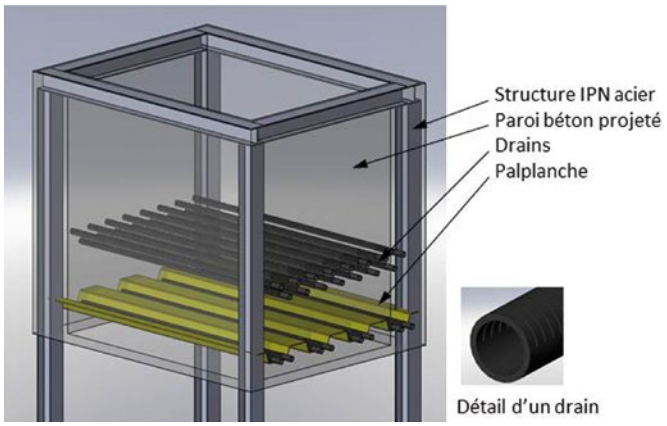

Figure 3. *Schéma de la structure interne du lysimètre.*

Figure 4. *Photographie des drains avant l'installation des débitmètres (photo : EMMAH).*

Les dispositifs de mesure

Le débitmètre 150 L/h

Organisation générale

Le débitmètre connecté aux drains supérieurs est conçu pour mesurer des débits couvrant une plage de mesure allant de 0 à 150 L/h soit un équivalent de précipitations de 0 à 31 mm/h. Son schéma général est donné **Figure 5.**

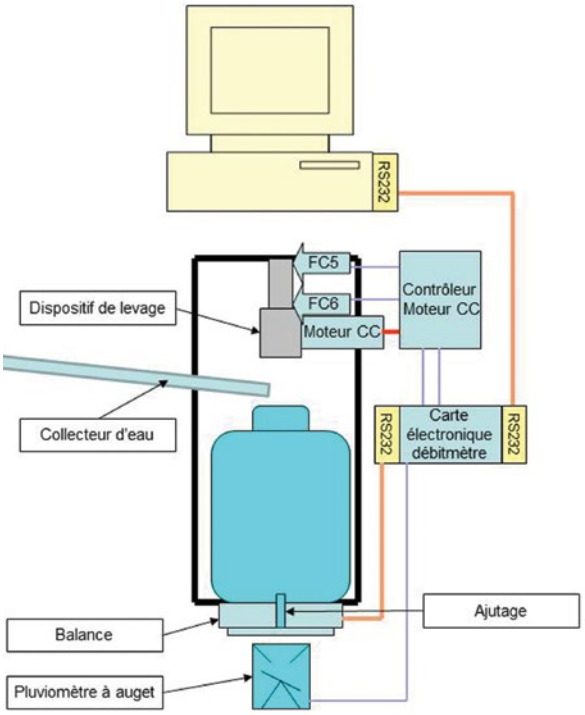

Figure 5. *Schéma général du débitmètre 150 L/h.*

L'eau drainée s'écoule dans le collecteur et tombe dans la bouteille. Cette bouteille est munie d'un ajutage qui calibre la fuite vers le pluviomètre à auget d'une capacité de 20 g disposé dessous. L'auget déclenche la mise en fonction du débitmètre lors de son premier basculement. Les basculements suivants caractérisent la mesure du débit au niveau de l'auget. La mise en fonction du débitmètre actionne la commande du vérin électrique qui dépose la bouteille sur la balance. La mesure du débit via la balance est calculée en sommant les variations de masse sur un intervalle de temps d'une minute. Pour obtenir la mesure de débit de ce dispositif, on ajoute le débit mesuré au niveau de la balance à celui mesuré au niveau de l'auget. Toutes les minutes, un ordinateur connecté au port série du débitmètre récupère les mesures mémorisées et les enregistre sur le disque dur. Si le débitmètre est en veille, l'ordinateur vérifie le bon fonctionnement de l'installation.

Principe de fonctionnement du débitmètre

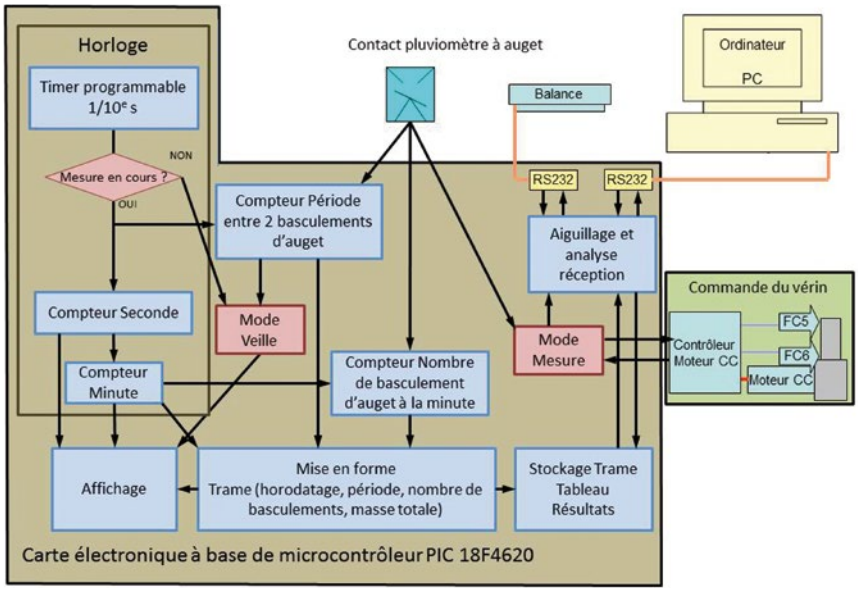

Figure 6. *Organisation des fonctions sur la carte électronique du débitmètre 150 L/h.*

La **Figure 6** représente l'organisation des fonctions mises en œuvre sur la carte électronique du débitmètre. Un microcontrôleur PIC 18F4620 gère son fonctionnement : son programme a été développé à l'aide de la plateforme MPLAB et du compilateur C18 de Microchip. Cette carte est connectée à :

✓ un ordinateur sous Windows XP. Le programme écrit avec la plateforme LabView permet, via un port RS232, de configurer le débitmètre, de commander certaines fonctions, de rapatrier les mesures et de les enregistrer sur le disque dur. Ce programme permet de gérer les deux débitmètres ;

✓ une balance munie d'un port RS232 pour mesurer la masse de la bouteille ;

✓ un contact du pluviomètre à auget basculeur. A chaque fois qu'un auget est plein (ici 20 g), il bascule et un contact se ferme fugitivement.

Le débitmètre est en mesure de fournir une mesure à un pas de temps paramétrable, défini par défaut à 1 min.

Les fonctions mises en œuvre dans le microcontrôleur sont décrites ci-dessous.

✓ L'horloge. La fonction de mesure de temps est assurée par le timer programmable du microcontrôleur. Celui-ci est programmé pour générer une interruption tous les dixièmes de seconde. Si la mesure est en cours, un compteur génère la seconde, et un autre compteur génère la minute. La seconde est utilisée entre autre pour l'affichage. La minute est utilisée pour définir le cadencement de la mise en disponibilité des résultats, et participe à la définition de l'horodatage.

✓ Les modes de fonctionnement. La carte électronique permet deux modes de fonctionnement : le mode « Veille », et le mode « Mesure ».

- Le mode « Veille » est le mode de démarrage du débitmètre. Le timer programmable est toujours actif, mais les compteurs sont à l'arrêt. Le vérin est en position haute (la bouteille ne repose pas sur la balance). Le système qui analyse la réception est actif : le débitmètre répond aux sollicitations de l'ordinateur. Le vérin peut être commandé, les constantes internes peuvent être reprogrammées, et si l'ordinateur demande un téléchargement des données, le débitmètre répond qu'il est en veille et que le tableau contenant les données est vide. Cette fonctionnalité permet de s'assurer que le débitmètre fonctionne toujours.

- Le mode « Mesure » est le mode de fonctionnement pendant lequel la mesure est en cours. Le débitmètre passe du mode « Veille » au mode « Mesure » grâce à un basculement d'auget. Dès cet instant, des compteurs sont mis en fonction en même temps que la trame de l'information est mise en forme.
  - Le compteur « Période » totalise les interruptions du timer programmable.
  - Le compteur « Nombre de basculements » totalise le nombre de basculements de l'auget pendant une minute. Deux cas peuvent se produire :
    - la période entre deux basculements d'auget est inférieure à une minute : le compteur de période n'est pas remis à zéro et le compteur du nombre de basculements totalise les basculements d'auget. Au niveau de l'affichage, la moyenne de la période sur la minute écoulée est affichée. Les contenus des compteurs sont mémorisés dans la trame de la ligne qui sera enregistrée dans l'ordinateur ;
    - la période entre deux basculements d'auget est supérieure à une minute : si une mesure est disponible dans le tableau Résultats, elle est transférée dans l'ordinateur. Si le tableau est vide, une chaîne de caractères est émise vers l'ordinateur signifiant qu'une mesure est en cours, et qu'elle sera sans doute disponible lors de la prochaine minute. Si la période dépasse une valeur limite, paramétrée par défaut à 16 min, le débitmètre est mis en veille.
  - La mise en forme de la trame : lorsqu'une mesure est disponible, un horodatage (nombre de jours, nombre d'heures et nombre de minutes de fonctionnement) débute la trame. Le champ suivant est la période entre deux basculements d'auget, suivi du nombre de basculements d'auget. La trame se termine par la masse mesurée par la balance. Tous les champs sont séparés par un point-virgule. A titre d'illustration, voici un extrait de fichier de mesure de ce débitmètre :

0J0:0:0; ;0; Départ mesure *	// Début du fichier : tous les compteurs sont à zéro
* Nacelle Basse *	// Les commentaires sont encadrés par des étoiles (*)
* Tableau de données vide *	// Fin de réponse du débitmètre quand le tableau est vide
* Mesure en cours *	// Quand l'ordinateur interroge le débitmètre, la mesure est
* Mesure en cours *	// en cours, mais pas encore disponible
0J0:3:0; 1663; 1; 9.215 kg	// première mesure disponible : un seul basculement d'auget
* Tableau de données vide *	// et période de 166,3 secondes
* Mesure en cours *	
…	
0J0:46:0; 684; 4; 9.245 kg	// dans la minute précédente, il y a eu 4 basculements
* Tableau de données vide *	// d'augets et les périodes cumulées sont de 68,4 secondes
0J0:47:0; 527; 3; 9.245 kg	// l'eau commence à s'accumuler dans la bouteille
* Tableau de données vide *	
0J0:48:0; 679; 4; 9.245 kg	
* Tableau de données vide *	
…	
0J8:16:0; 9229; 1; 9.245 kg	
* Tableau de données vide *	
* Mesure en cours *	
* Mesure en cours *	
* Mesure en cours *	
* Mesure en cours *	
* Mesure en cours *	
* Mesure en cours *	
* Mesure en cours *	
* Mesure en cours *	

** Mesure en cours **
** Mesure en cours **
** Mesure en cours **
** Mesure en cours **
** Mesure en cours **
** Mesure en cours **
** Mesure en cours **

*0J8:31:48; ; ; * En veille ** // Au bout de 16 min d'inactivité, le débitmètre se met en
** Nacelle Haute ** // veille. La nacelle est replacée en position haute
** Tableau de données vide ** // Le tableau qui contient les données est vide
** En veille : Débit non mesurable ** // Le débitmètre est en veille, mais il répond à la demande de
** Tableau de données vide ** // l'ordinateur

- Le stockage de la trame. Quand la trame est prête, elle est stockée dans un tableau où sont disponibles les résultats. Ce tableau peut contenir 10 mesures.

✓ L'aiguillage et l'analyse de la réception du signal

- L'aiguillage des ports RS232 : le microcontrôleur qui équipe la carte électronique du débitmètre est un PIC 18F4620, et ne dispose que d'un seul port série. L'aiguillage est positionné par défaut sur l'ordinateur. Lors d'une interrogation de l'ordinateur, le débitmètre est en mesure de lui répondre. Si une mesure est en cours, à la minute où le débitmètre édite une mesure, l'aiguillage connecte la balance au débitmètre qui lui envoie une demande de mesure. La balance répond, et l'aiguillage revient en position initiale. Si l'ordinateur émet une demande pendant que l'aiguillage connecte le débitmètre à la balance, la demande est ignorée. Le tableau de stockage des trames de mesure permet de mémoriser jusqu'à 10 mesures.
- L'analyse de la réception : l'analyse de la réception est une fonction toujours active, quel que soit le mode dans lequel se trouve le débitmètre. Elle permet de différencier une instruction d'un opérande. Ainsi, il est possible de lire et de reprogrammer les paramètres fondamentaux du débitmètre (période de cumul des basculements d'auget : 1 min, période sans basculement avant mise en veille : 16 min) et aussi de contrôler la validité des trames reçues provenant de la balance.

✓ La commande du vérin

Le mode « Mesure » active le vérin et dépose la bouteille sur la balance. Si le vérin n'arrive pas à destination dans le laps de temps qui lui est imparti, le contrôleur du moteur à courant continu envoie un niveau logique au débitmètre lui indiquant un dysfonctionnement du vérin. Celui-ci est enregistré dans le fichier de données comme un commentaire.

La **Figure 7** représente une vue synthétique du projet Solidworks avec une photographie du débitmètre prêt à être installé.

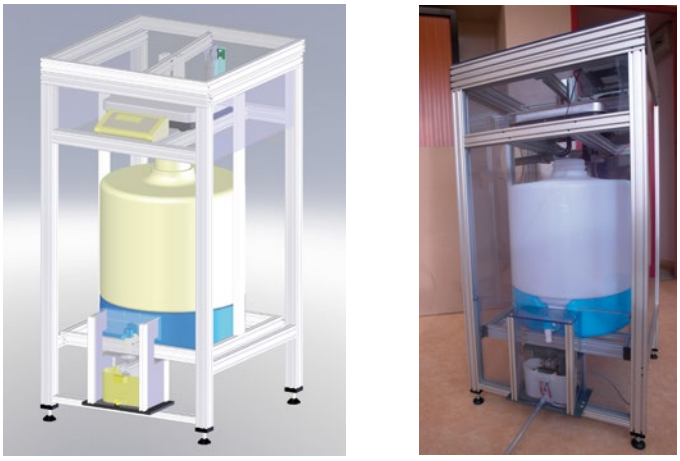

Figure 7. *Photographies du projet Solidworks et du débitmètre terminé (photo : EMMAH).*

Le débitmètre 450 L/h

Organisation générale

Ce débitmètre est conçu pour mesurer des débits couvrant une plage de mesure allant de 0 à 450 L/h soit un équivalent de précipitations de 0 à 95 mm/h. Son schéma général est donné **Figure 8.**

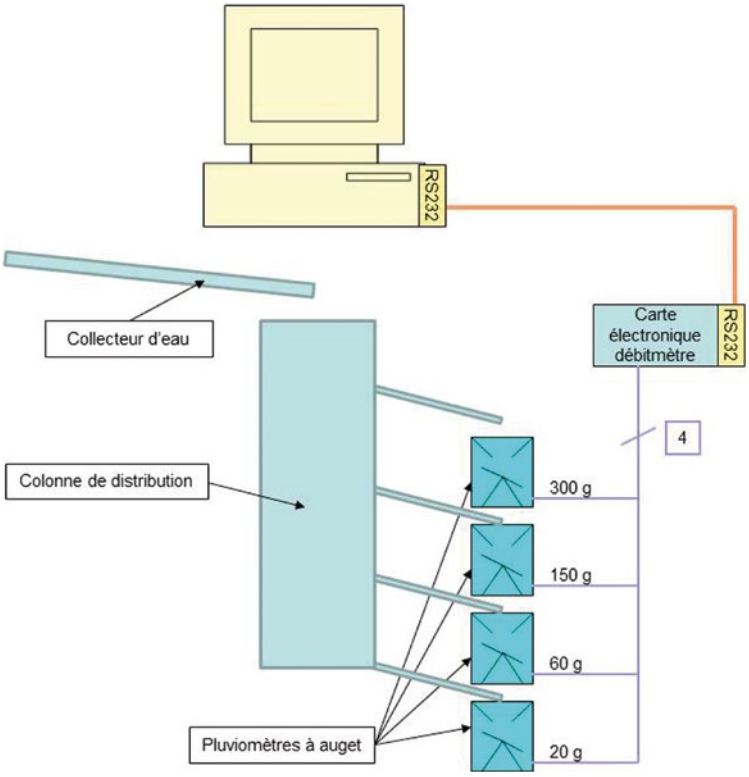

Figure 8. *Schéma général du débitmètre 450 L/h.*

L'eau drainée s'écoule dans le collecteur et tombe dans la colonne de distribution. Celle-ci est équipée de quatre ajutages qui limitent le débit vers quatre augets dont les capacités respectives sont de 20 g, 60 g, 150 g et 300 g. Le débitmètre mesure chaque intervalle de temps entre deux basculements d'auget sur une période d'une minute. Le débit total est la somme des débits mesurés. Toutes les minutes, le même ordinateur connecté au port série du débitmètre récupère les mesures en mémoire et les enregistre sur le disque dur. Si le débitmètre est en veille, l'ordinateur vérifie le bon fonctionnement de l'installation.

Principe de fonctionnement du débitmètre

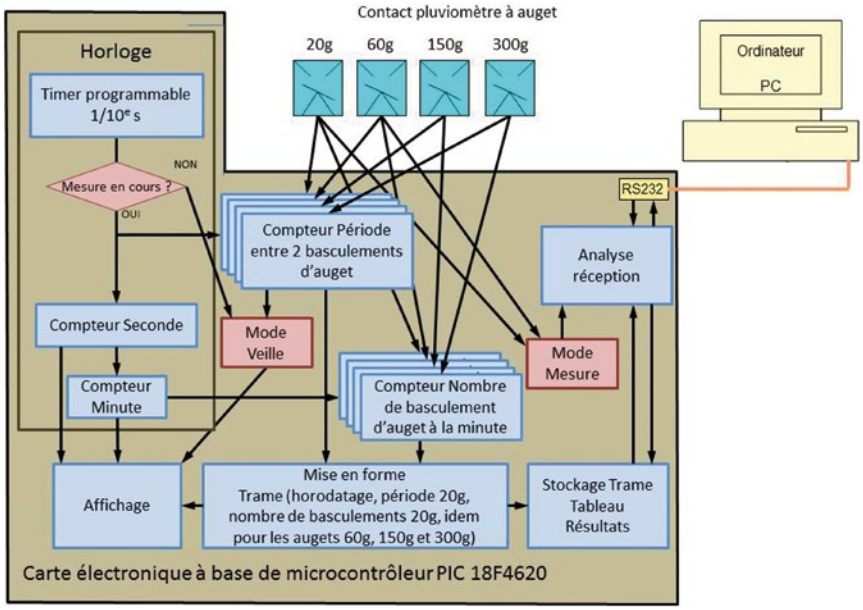

Figure 9. *Organisation des fonctions sur la carte électronique du débitmètre 450 L/h.*

La **Figure 9** représente l'organisation des fonctions mises en œuvre sur la carte électronique du débitmètre. Un microcontrôleur PIC 18F4620 gère son fonctionnement, son programme a été développé à l'aide de la plateforme MPLAB et du compilateur C18 de Microchip. Cette carte est connectée à :

✓ un ordinateur sous Windows XP. Le même programme écrit avec la plateforme LabView décrit précédemment dispose des mêmes fonctions pour ce débitmètre.

✓ un contact des pluviomètres à auget basculeur. Ils sont au nombre de quatre. A chaque fois qu'un auget est plein il bascule, et son contact associé se ferme fugitivement.

Le débitmètre est en mesure de fournir une mesure à un pas de temps paramétrable défini par défaut à 1 minute.

Les fonctions mises en œuvre dans le microcontrôleur sont identiques à celles décrites précédemment pour le débitmètre 150 L/h avec quelques variantes.

✓ L'horloge. Son fonctionnement est identique à celui du débitmètre 150 L/h (cf. ci-dessus).

✓ Les modes de fonctionnement. La carte électronique permet deux modes de fonctionnement : le mode « Veille » et le mode « Mesure ».

- Le mode « Veille » est identique au précédent mais ne fait pas intervenir le verrin.

- Le mode « Mesure » est identique au précédent mais se déclenche dès le basculement de l'auget 20 g ou de l'auget 60 g. Les augets inactifs sont considérés en veille et leur compteur reste à zéro.
  - Les compteurs « Période » totalisent les interruptions du timer programmable sur les augets actifs.
  - Les compteurs « Nombre de basculements » totalisent le nombre de basculements des augets actifs pendant une minute. Deux cas peuvent se produire, identiques à ceux décrits précédemment avec une mise en veille du débitmètre lorsque la période entre deux basculements d'auget est supérieure à 90 min au lieu de 16 min.
  - La mise en forme de la trame est identique mais comporte, à la suite, les périodes et les nombres de basculements des augets 20, 60, 150 puis 300 g. Le fonctionnement des augets est asynchrone, aussi pour renseigner la période de l'auget en veille, ou dont la mesure est en cours, un « XX » remplit le champ. Tous les champs sont séparés par un point-virgule. A titre d'illustration, voici un extrait de fichier de mesure de ce débitmètre :

```
0J0:0:0; ;0; ;0; ;0; ;0;* Départ mesure *     // Début du fichier : tous les compteurs sont à zéro
* Tableau de données vide *                   // Fin de réponse du débitmètre quand le tableau est vide
* Mesure en cours *                           // Quand l'ordinateur interroge le débitmètre, la mesure est
* Mesure en cours *                           // en cours, mais pas encore disponible
…                                            // Les commentaires sont encadrés par des étoiles (*)
* Mesure en cours *
0J0:14:0; 8255; 1; XX; 0; XX; 0; XX; 0;      // première mesure disponible : un seul basculement d'auget
* Tableau de données vide *                   // après 14 min de fonctionnement. La période est de
* Mesure en cours *                           // 825,5 secondes. Les autres augets ne sont pas actifs : « XX »
* Mesure en cours *                           // remplit les champs « Période » et « 0 » indique qu'il n'y
…                                            // a pas eu de basculement sur aucun des autres augets
3J1:19:0; 620; 6; XX; 0; XX; 0; XX; 0;
* Tableau de données vide *
3J1:20:0; 617; 6; XX; 1; XX; 0; XX; 0;       // L'auget de 20g a effectué 6 basculements et son compteur
* Tableau de données vide *                   // Période accumule 61,7 secondes. L'auget 60 g vient de
…                                            // basculer
3J3:32:0; 627; 6; XX; 1; XX; 0; XX; 0;
* Tableau de données vide *
3J3:33:0; 552; 5; 4500; 1; XX; 0; XX; 0;     // Nouveau basculement de l'auget 60 g. La période est de 450 s
* Tableau de données vide *                   // A noter, cet extrait de mesure n'est pas issu du même fichier
3J3:34:0; 562; 5; XX; 1; XX; 0; XX; 0;       // que le précédent : les horodatages ne correspondent pas
* Tableau de données vide *
…
3J5:0:0; 678; 5; XX; 1; XX; 0; XX; 0;
* Tableau de données vide *
3J5:1:0; 546; 4; XX; 1; XX; 0; XX; 0;        // Après 90 minutes d'inactivité, l'auget 60 g est mis en veille
* Tableau de données vide *
3J5:2:0; 549; 4; XX; 0; XX; 0; XX; 0;        // Le nombre de basculement est repassé à zéro
* Tableau de données vide *

* Mesure en cours *
* Mesure en cours *
16J2:52:45; ; ; ; ; 1; XX; 0; XX; 0; XX; 0;  // Au bout de 90 min d'inactivité, le débitmètre se met en
* Tableau de données vide *                   // veille. Le tableau qui contient les données est vide
* En veille : débit non mesurable *          // Le débitmètre est en veille, mais il répond à la demande de
* Tableau de données vide *                   // l'ordinateur
* En veille : débit non mesurable *
* Tableau de données vide *
* En veille : débit non mesurable *
```

✓ Le stockage de la trame est identique à celui décrit ci dessus.

✓ L'analyse de la réception. Cette fonction est toujours active, quel que soit le mode dans lequel se trouve le débitmètre. Elle permet de différentier une instruction d'un opérande. Ainsi, il est possible de reprogrammer les paramètres fondamentaux du débitmètre (période de cumul des basculements d'auget : 1 min, période sans basculement avant mise en veille : 90 min).

La **Figure 10** représente une vue synthétique du projet Solidworks et une photographie du débitmètre prêt à être installé.

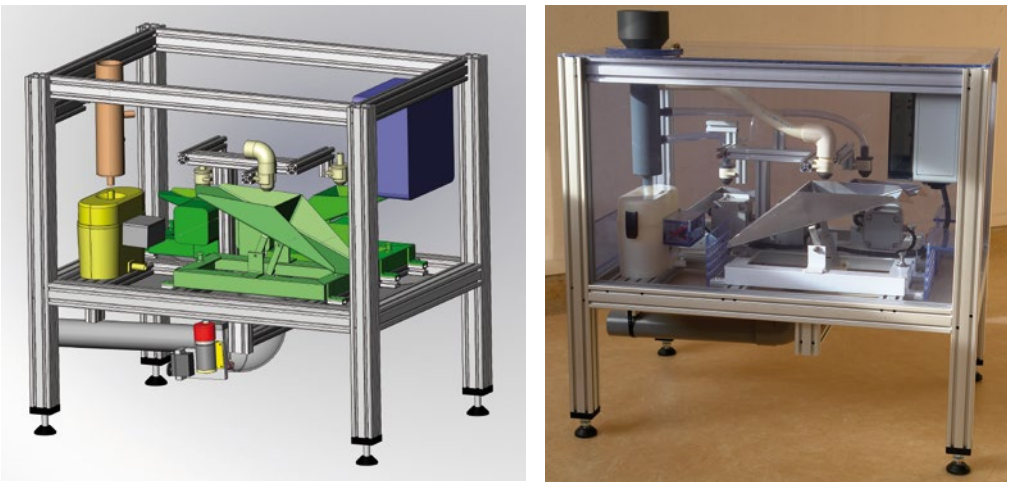

Figure 10. *Photographies du projet Solidworks et du débitmètre terminé (photo : EMMAH).*

Implantation sur site

L'implantation des deux débitmètres a nécessité la construction d'un ouvrage en béton pour positionner convenablement les instruments vis-à-vis des exutoires des collecteurs (**Figure 11**). Cet ouvrage a été dimensionné pour résister à la poussée d'Archimède liée à la proximité de la nappe en période de hautes eaux. La partie inférieure de l'ouvrage est équipée d'une pompe de relevage afin d'évacuer les eaux de drainage vers la nappe.

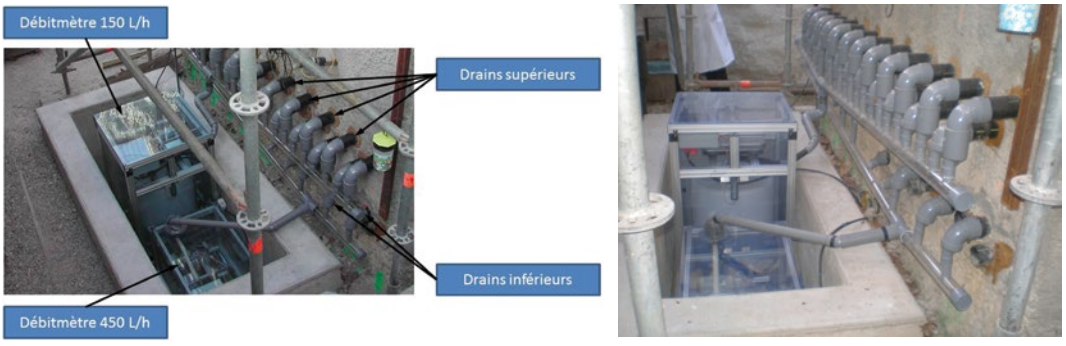

Figure 11. *Photographies des drains et de leurs raccordements aux débitmètres (photo : EMMAH).*

Acquisition des données

Un ordinateur sous Windows XP héberge le programme d'acquisition des données (**Figure 12**). Il est écrit en langage graphique sous Labview. Deux ports séries sont utilisés pour communiquer avec les deux débitmètres. L'application dispose de plusieurs onglets qui permettent :

- la configuration des débitmètres (définition des références, remise à zéro des compteurs internes et commande manuelle des fonctionnalités) ;
- la visualisation du tableau de bord de l'installation, et le calcul des débits toutes les minutes ;
- la visualisation des débits pour les deux séries de drains.

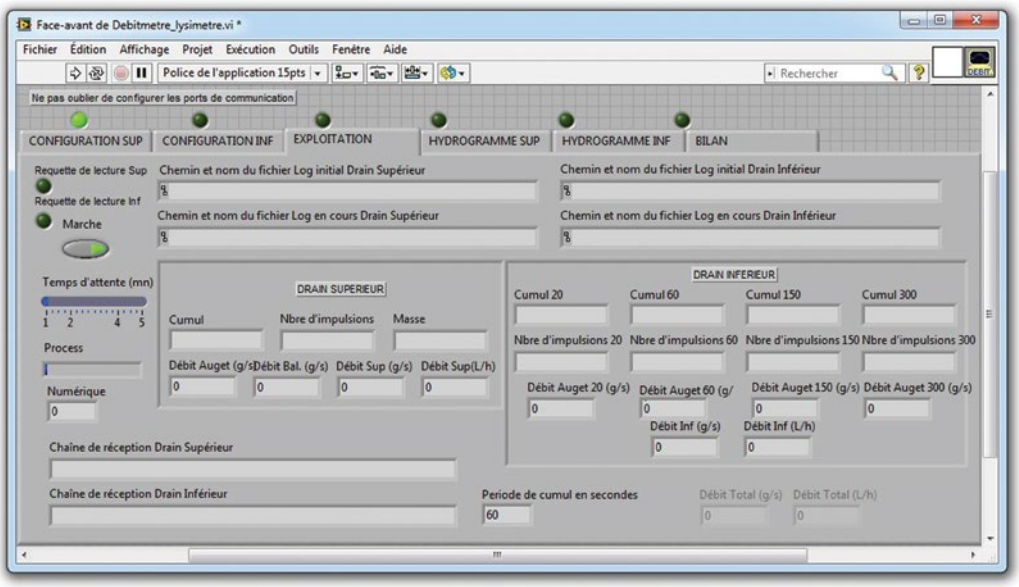

Figure 12. *Vue de l'onglet « exploitation » de l'application.*

Le volet « Bilan » n'est pas implémenté car le bilan hydrique ne peut être obtenu qu'avec un post-traitement des données recueillies. Il est en effet nécessaire de tenir compte des formules mathématiques de correction établies lors de l'étalonnage du matériel.

Procédure d'étalonnage

Le générateur de débit constant

Pour réaliser un étalonnage, il est nécessaire de générer un débit constant qui sera mesuré le plus précisément possible et qui servira d'étalon de travail afin de le comparer à la mesure du débitmètre à étalonner. Nous avons conçu un tel dispositif où l'opération s'effectue en circuit fermé (**Figure 13 et 14**).

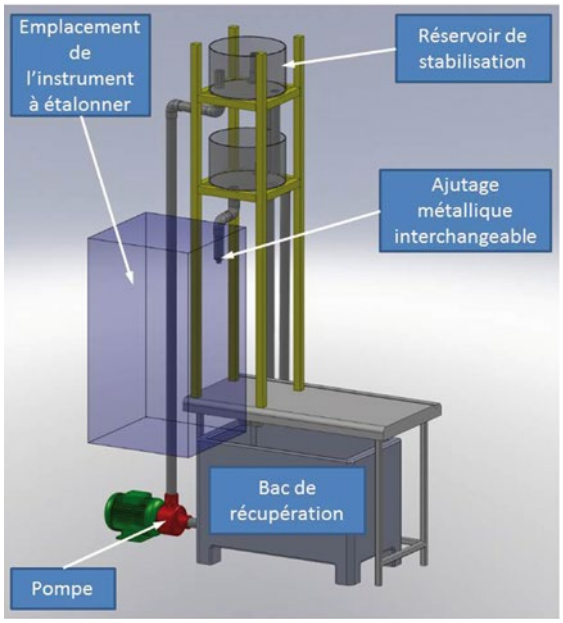

Figure 13. *Vue de synthèse du système d'étalonnage des débitmètres.*

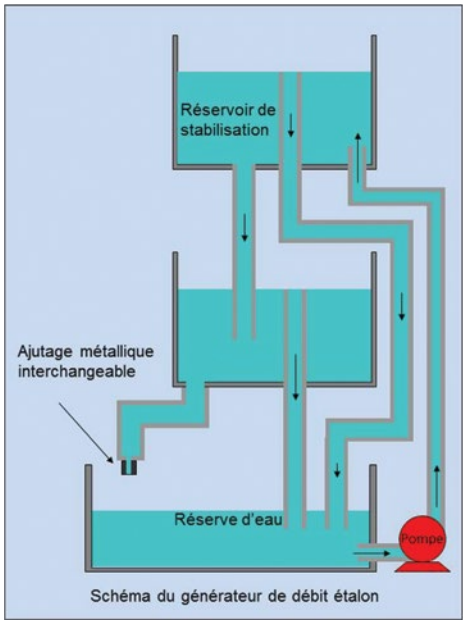

Figure 14. *Schéma du générateur de débit étalon.*

La pompe propulse l'eau dans le réservoir de stabilisation. Le niveau monte jusqu'à ce qu'il atteigne le niveau du déversoir. La partie basse du réservoir est équipée d'une conduite qui achemine l'eau dans un second réservoir. A ce niveau, le débit est constant, mais peut subir des variations liées aux turbulences générées dans le réservoir de stabilisation par la pompe. Le fonctionnement du deuxième bac est similaire au réservoir de stabilisation, mais l'écoulement de l'eau est stabilisé : les turbulences ne sont plus visibles. La surface eau/air est parfaitement régulière quel que soit le débit généré. La plage de débit couverte par le générateur va de 2 L/h à 800 L/h. La stabilité de la mesure est meilleure que 0,1 %.

La procédure d'étalonnage

Les étalonnages des deux débitmètres sont réalisés annuellement juste après leur maintenance. Après un nettoyage méticuleux, il faut vérifier la balance du débitmètre 150 L/h ainsi que l'équilibrage des augets des deux débitmètres. Ensuite, le débitmètre à étalonner est installé sous l'ajutage du générateur de débit, son exutoire devant alimenter le bac de récupération de l'installation. L'étalonnage consiste à comparer le débit indiqué par le débitmètre à celui qui traverse l'appareil. Le générateur de débit, grâce à un jeu d'ajutages usinés selon le besoin, peut fournir les débits suivants : 2 L/h, 10 L/h, 34 L/h, 52 L/h, 73 L/h, 100 L/h, 144 L/h, 250 L/h, 350 L/h, 440 L/h et 550 L/h. Dans un premier temps, le flux d'eau devant traverser le débitmètre est dévié pour être mesuré par un opérateur : il faut remplir d'eau un récipient en mesurant le temps de remplissage. La quantité d'eau ainsi prélevée est pesée. Ensuite la déviation est retirée et le flux d'eau traverse le débitmètre. La période d'acquisition dure 30 min pour accumuler un nombre suffisant de mesures. A l'issue de cette période, la déviation est remise en place et l'opérateur mesure à nouveau le débit. Une fiche Excel, spécialement développée pour l'étalonnage, permet de vérifier la validité des mesures manuelles ainsi que celles effectuées par le débitmètre. Une fiche récapitulative permet la détermination de la fonction mathématique pour transformer les données acquises en valeurs de débit utilisables par les chercheurs.

Résultats

Les étalonnages

Les courbes d'étalonnage représentent le coefficient multiplicatif à appliquer à la mesure relevée pour obtenir la valeur du débit qui traverse l'instrument (voir **Figures 15 et 17** pour les débitmètres 150 L/h et 450 L/h respectivement). Les courbes des coefficients de variation (écart type / moyenne des mesures) représentent la dispersion relative des mesures relevées pour des débits constants (voir **Figures 16 et 18** pour chacun des deux débitmètres).

Débitmètre 150 L/h

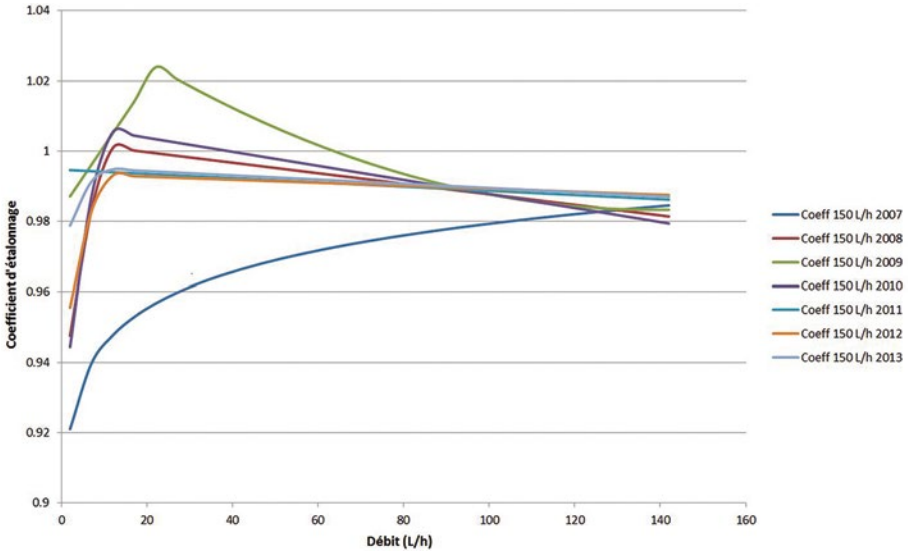

Figure 15. *Comparatif des coefficients d'étalonnage en fonction du débit entre 2007 et 2013.*

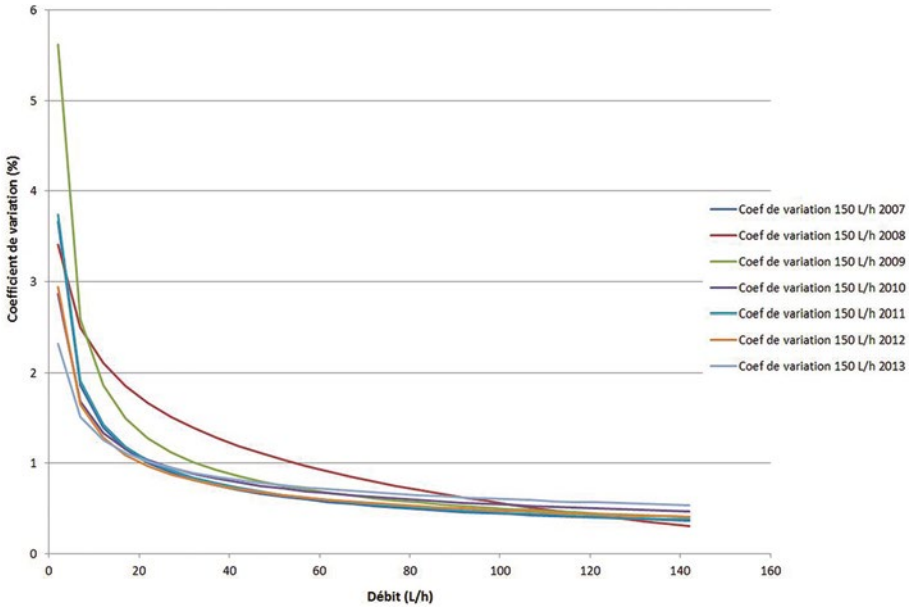

Figure 16. *Comparatif des coefficients de variation en fonction du débit entre 2007 et 2013.*

Le comparatif des coefficients d'étalonnage montre une allure similaire des différentes courbes. La singularité de la courbe d'étalonnage de 2007 n'est pas expliquée. La mesure des très faibles débits est délicate avec un coefficient de variation qui peut monter jusqu'à 6 %. L'origine de ce défaut provient de la balance qui indique une mesure oscillant entre 0 et 5 g. Ces informations viennent parasiter les mesures de l'auget. L'augmentation du débit montre que les coefficients de variation diminuent rapidement et deviennent inférieurs à 1 % à partir de 60 L/h, toutes courbes confondues et quelle que soit l'année de l'étalonnage.

Débitmètre 450 L/H

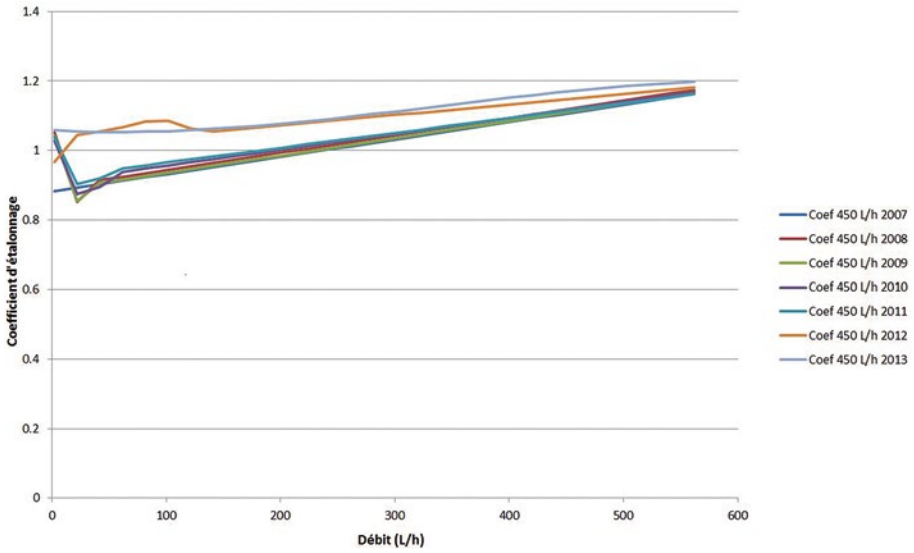

Figure 17. *Comparatif des coefficients d'étalonnage en fonction des débits entre 2007 et 2013.*

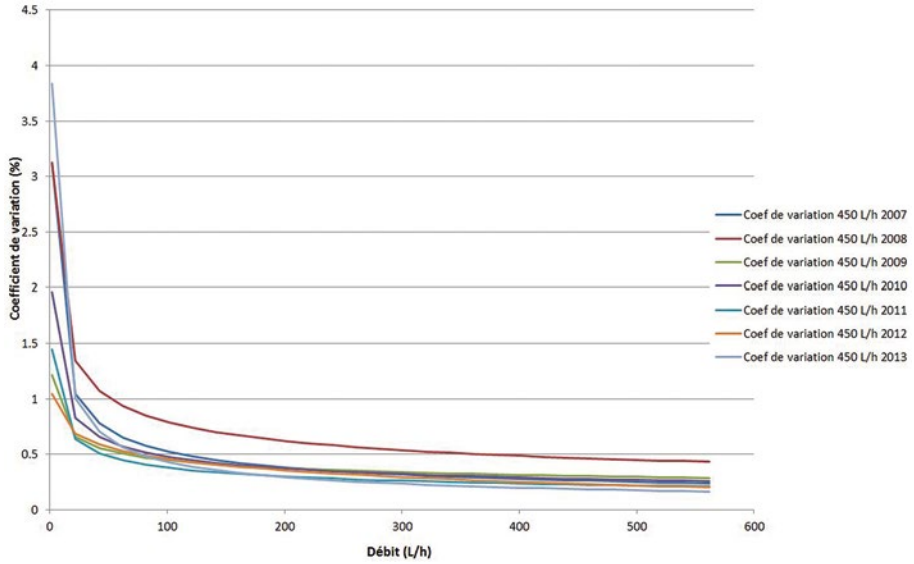

Figure 18. *Comparatif des coefficients de variation en fonction du débit entre 2007 et 2013.*

Le comparatif des coefficients d'étalonnage montre deux groupes de courbes. L'évolution du type de courbe s'explique par le démontage, en 2012, de l'ensemble des augets afin de nettoyer et lubrifier les pivots. La mesure des petits débits reste délicate, avec toutefois des coefficients de variation plus faibles que pour le débitmètre 150 L/h (inférieur à 4 %).

Les données obtenues

Nous présentons ici les résultats de mesures obtenues dans trois conditions d'humidité de sol différentes. L'indicateur d'humidité du sol est représenté par la notion de pluie efficace en hydrologie, calculée par la différence « Pluie – EvapoTranspiration Potentielle ». L'évolution de cet indicateur est donnée sur deux années hydrologiques contrastées (voir **Figure 19**). Trois épisodes pluvieux (novembre 2007, février 2008, janvier 2009) ont été individualisés, dont les caractéristiques sont données dans la **Figure 20**.

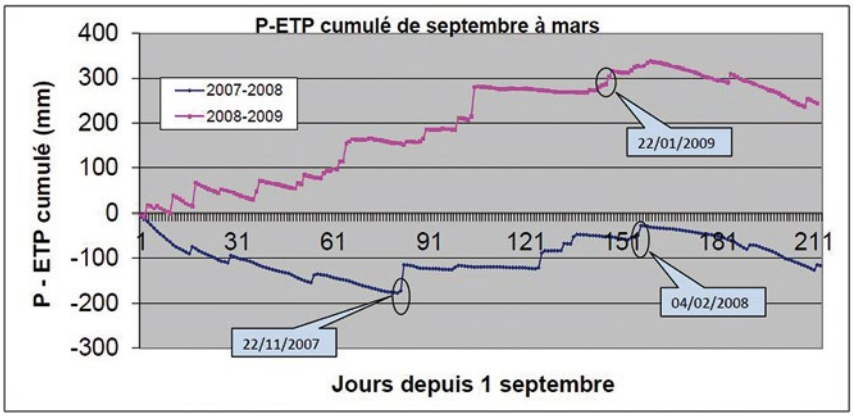

Figure 19. *Représentation du signal « Pluie – EvapoTranspiration Potentielle » entre 2007 et 2009.*

Episode	Temps de percée	Cumul de pluie	Cumul drainé		Coefficient de restitution (Q drainé / Q pluie)	Pluie – ETP (Sur les 15 jours précédents)
			Ecoulement préférentiel (drains haut) (mm)	Ecoulement global (drains bas) (mm)		
22/11/07	1 h 25	49,5 mm (en 15 heures)	Rien	1,89 mm (en 0 h 48)	3,82%	-19
04/02/08	5 h 54 (haut) 3 h 53 (bas)	24,8 mm (en 7 heures)	0,021 mm (en 3 h 13)	5,12 mm (en 28 jours)	20,7% 0,1% drains hauts 20,6% drains bas	-0,1
26/01/09	2 h 33 (haut) 0 h 48 (bas)	53,6 mm (en 9 jours)	23,1 mm (en 15 heures)	32 mm (en 10 jours)	102% 43% drains hauts 59% drains bas	34,1
		32 mm (en 11 heures)	55,1 mm - 21,6 mm = 33,5 mm		104%	

Figure 20. *Récapitulatif des mesures.*

Episode pluvieux du 22/11/2007 (**Figures 21 et 22**) :

le sol est sec (« Pluie – ETP » négatif). La quantité d'eau drainée est faible, ainsi que le coefficient de restitution (4 %). On peut remarquer une évolution semblable de la pluie et du drainage (**Figure 22**) et un temps de percée (temps nécessaire à une goutte d'eau pour traverser la hauteur du bloc de sol) très court : 1 h 25.

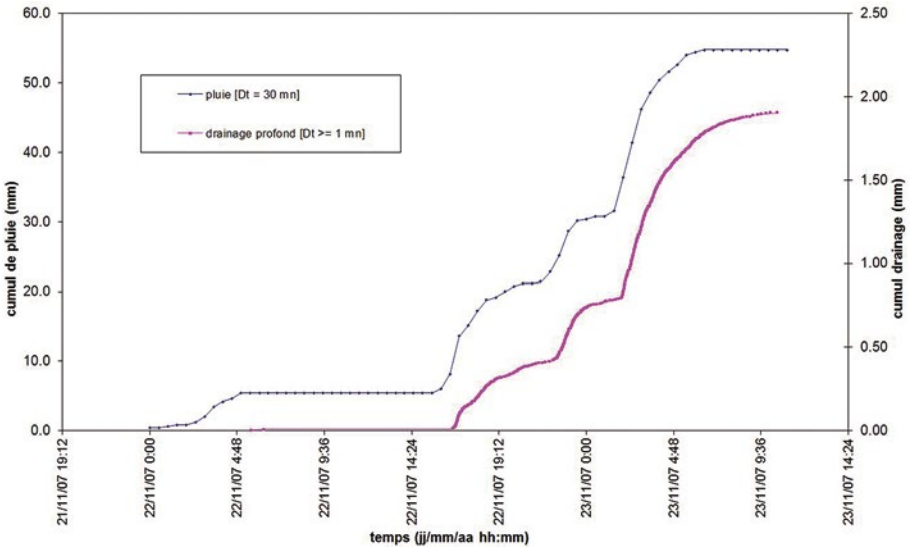

Figure 21. Cumul de pluie et de drainage en fonction du temps le 22/11/2007.

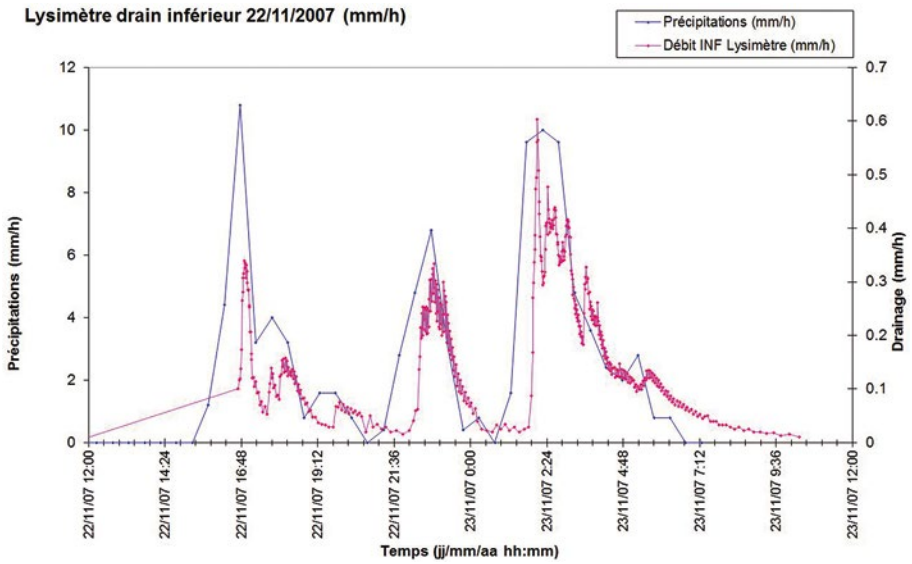

Figure 22. Précipitations et drainage en fonction du temps le 22/11/2007.

Episode pluvieux du 04/02/2008 (**Figures 23 et 24**) :

le sol est plus humide (« Pluie – ETP » proche de zéro). La quantité d'eau drainée reste faible, mais le coefficient de restitution est de 20 %. La restitution est longue (28 jours) et différée.

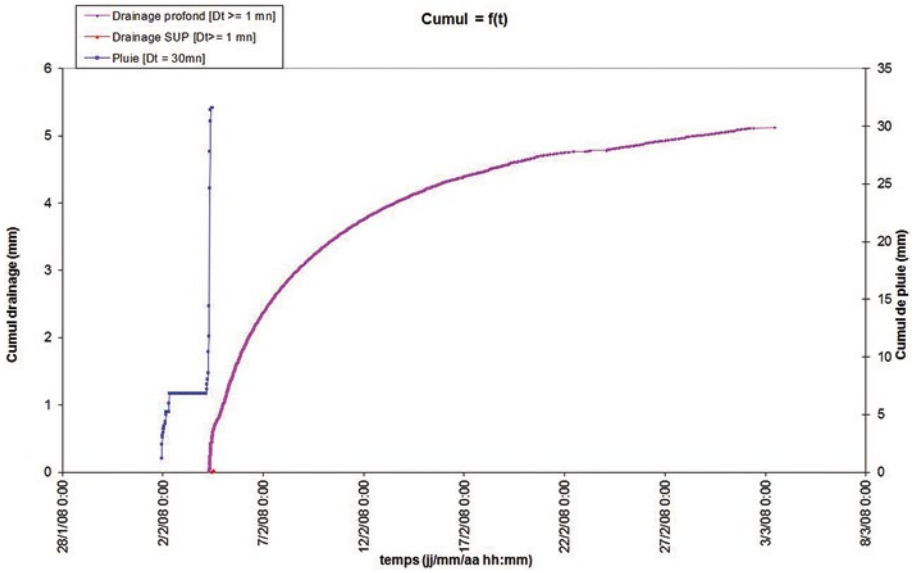

Figure 23. *Cumul de pluie et de drainage en fonction du temps le 04/02/2008.*

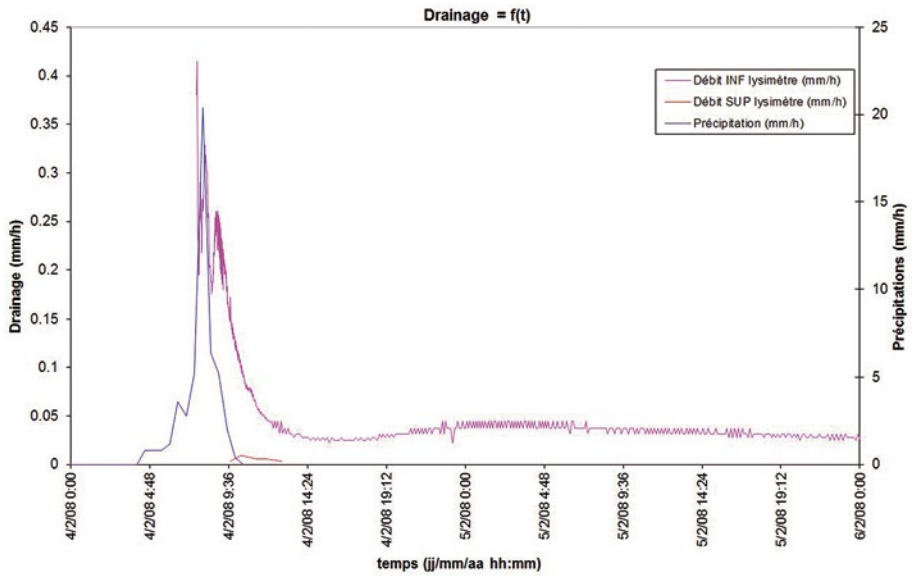

Figure 24. *Précipitations et drainage en fonction du temps le 04/02/2008.*

Episode pluvieux du 26/01/2009 (**Figures 25 et 26**) :

le sol est très humide (« Pluie – ETP » positif). La quantité d'eau drainée est importante et le coefficient de restitution est maximal (100 %). L'eau est transférée complètement. Des chemins préférentiels sont activés.

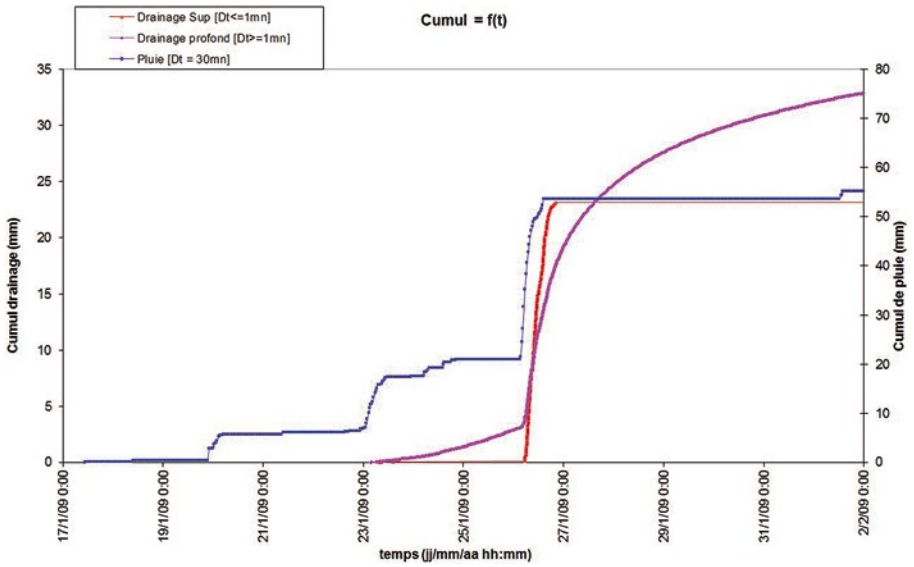

Figure 25. *Cumul de pluie et de drainage en fonction du temps le 26/01/2009.*

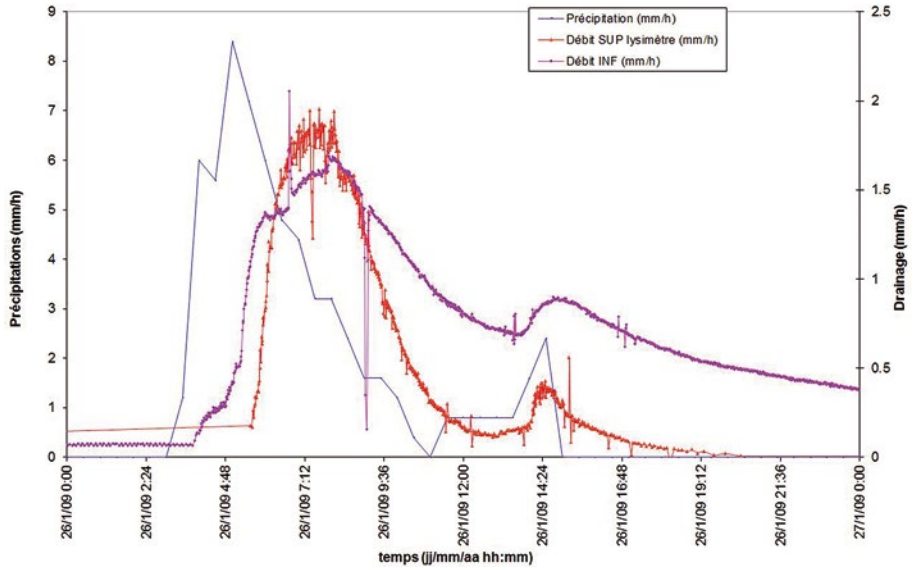

Figure 26. *Précipitations et drainage en fonction du temps le 26/01/2009.*

Retour d'expérience

L'analyse *a posteriori* de la phase de conception de ces deux débitmètres, et un recul de plusieurs années de fonctionnement sur site permettent de formuler plusieurs points sur le retour d'expérience.

Mise au point

Sensibilité aux orages : le disjoncteur qui sécurise l'installation électrique du lysimètre se déclenche un peu trop facilement pendant les orages. L'onduleur alimente l'installation jusqu'à ce que les batteries soient vides. Les conséquences sont les suivantes : un arrêt brutal de l'installation et une absence de mesures. Certaines améliorations ont été alors mises en œuvre : (i) nous avons effectué le remplacement du disjoncteur par un modèle industriel insensible aux perturbations électromagnétiques ; (ii) nous avons installé un programme superviseur d'onduleur sur l'ordinateur et avons assuré la connexion de l'ordinateur au réseau informatique pour permettre la retransmission par mail des alertes (absence secteur, tension batterie trop basse, etc.).

Sensibilité au colmatage : les évènements pluvieux brutaux provoquent l'arrachement de particules plus ou moins fines de sol qui sont entraînées avec l'eau. Ces particules sont quasi inexistantes au niveau des drains supérieurs. En revanche, leurs dépôts sont bien visibles dans les collecteurs des drains inférieurs et dans le débitmètre 450 L/h. Lors d'épisodes cévenols intenses, comme le 18/12/2008, une coulée de boue est venue remplir la colonne de distribution des augets. Le remède a été la mise en place d'un bac de décantation en amont du système de mesure, pour séparer les particules solides de l'eau (**Figure 27**). Initialement, une bouteille était prévue pour maintenir le niveau constant dans la cuve, mais après quelques mois d'utilisation, nous avons constaté que l'évaporation de l'eau du bac était très faible, il n'était donc pas utile d'installer un système de rattrapage de niveau.

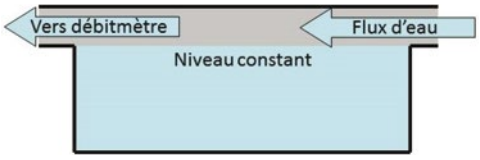

Figure 27. *Schéma du bac de décantation.*

Sensibilité aux… grenouilles ! En 2011, des enregistrements de mesure sont détectés sur le débitmètre 150 L/h alors que ni irrigation, ni précipitation ne sont constatées. Il s'avère que des grenouilles se sont installées dans l'auget sous la bouteille de 50 L. La mise en place d'une grille en métal déployée sous le débitmètre a permis de résoudre ce problème.

Ce qu'il faudrait refaire

Le principe même de fonctionnement du débitmètre 150 L/h est à revoir car la sensibilité de la balance à la dérive thermique introduit une incertitude sur ses mesures. Une solution serait de reprendre l'architecture du débitmètre 450 L/h. Nous pourrons aussi supprimer l'auget de 300 g car la plage de mesure restante serait suffisante pour répondre pleinement au besoin des drains supérieurs.

Ce qu'il reste à faire

Actuellement, le signal de pluie est acquis avec un pas de temps de 30 min sur un dispositif d'acquisition différent de celui des débitmètres. L'idéal serait d'acquérir ce signal avec la même discrétisation que les mesures de débit, soit une minute et en parfaite synchronisation avec la mesure des débitmètres. Cette adaptation serait reliée à l'ordinateur via un port série. L'application serait aussi à adapter pour être en capacité d'enregistrer ces nouvelles mesures.

Nous souhaitons aussi construire un banc d'étalonnage pérenne qui puisse prendre en charge la mesure du débit du générateur de débit sans que l'opérateur intervienne directement. Actuellement, cette mesure réalisée par l'opérateur est sensible à son savoir-faire.

Enfin, la simplification des fichiers de données permettra une extraction plus aisée des mesures, et donc un traitement plus rapide. Il faudra donc intégrer les formules d'étalonnages à l'application et enregistrer les données brutes et les mesures élaborées.

Conclusion

Ce travail de conception, de réalisation et d'installation a duré deux ans. Ce système de mesure fonctionne depuis 2007 en milieu extérieur. Il a la particularité de mesurer des débits sur des flux d'eau à surface libre avec une gamme de mesure (i) de zéro à 150 L/h, soit un équivalent de précipitation de 31 mm/h, pour le débitmètre connecté aux drains d'interception et (ii) de zéro à 450 L/h, soit un équivalent de précipitation de 95 mm/h, pour le débitmètre connecté aux drains contre les palplanches, avec une résolution de 20 g qui correspond à 0,004 mm de précipitation. Quelques modifications, comme le changement d'un disjoncteur de l'installation électrique, la mise en place d'un bac de décantation, et la pose de grilles « pare grenouilles » ont été nécessaires pour fiabiliser le fonctionnement de l'installation. Après 7 ans de fonctionnement, l'installation a subi deux pannes : la première, due à un impact de foudre proche du site de mesure, a nécessité le remplacement d'un microcontrôleur et d'une carte port série sur l'ordinateur ; et la deuxième, due à un ordinateur en fin de vie, a nécessité le remplacement de l'unité centrale.

Les mesures montrent une variabilité importante de comportements, et des temps de percée courts (quelques heures au maximum pour arriver à 2,5 m de profondeur). Ce temps de percée met en évidence la fragilité de la nappe phréatique vis-à-vis des risques de transfert de polluants mobiles avec l'eau. L'intérêt du dispositif débitmétrique est qu'il est conçu pour échantillonner les eaux de drainage, permettant ainsi de suivre le cheminement des polluants, des particules et des bactéries depuis la surface du sol jusqu'à la nappe (voir par ex. Brillard et al., 2015). Ceci participe à l'amélioration de la compréhension du transport complexe dans les sols.

Références bibliographiques

Brillard J, Dupont C, Berge O, Dargaignaratz C, Oriol-Gagnier S, Doussan C , Broussolle V, Gillon M, Clavel T, Bérard A (2015) The water cycle, a potential source of the bacterial pathogen *Bacillus cereus*. BioMed Research International. Special issue "Contamination of ready-to-eat food by emerging and neglected pathogens and the role of environment" 2015, Article ID 356928, 15 pages http://dx.doi.org/10.1155/2015/356928

Bogner C, Marc V, Di Pietro L, Doussan C, Ruy S, Gaudu JC, Perrin P, Cognard-Plancq AL, Emblanch C, Daniel M, Simler R (2004) Tracer study of infiltration in a field soil - simulated rainfall experiment on a large lysimeter. International Workshop on the Application of Isotope Techniques in Hydrological and Environmental Studies: 6-8 November 2004; Paris.

Chapelet A, Debroux M, Tison F, Di Pietro L, Doussan C, Joelson M, Marc V, Ruy S (2012) An experimental set up in Avignon (South of France) for the multiscale study of preferential flow in soil and of groundwater recharge processes; Colloque EuroSoil 2012, Bari, 2-6 juillet, (p. 1901).

Garel E, Marc V, Ruy S, Doussan C, Simler R, Daniel M, Tison F (2007) Infiltration processes and impact on shallow groundwater in agricultural dry land areas. International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in Sustainable Water Resources Management, (IHS–2007), May 2007, Vienne.

Margat J (2001) Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde, UNESCO - BRGM.