

## Automatisation du dispositif de Müntz pour la détermination *in situ* de la conductivité hydraulique à saturation

François GARNIER<sup>1</sup>, Yassin ELAMRI

**Résumé.** Pour de nombreuses disciplines scientifiques telles que l'hydrologie ou l'agronomie, la conductivité hydraulique à saturation d'un sol notée  $K_s$  est un paramètre essentiel lorsque l'on s'intéresse au transfert d'eau en surface et/ou dans les sols. Bien que différents dispositifs de mesure *in situ* existent, ces derniers n'ont pas permis de répondre aux objectifs spécifiques liés à l'étude de l'infiltrabilité des fonds de fossés agricoles par l'UMR LISAH (INRA Montpellier). Nous avons alors procédé à une automatisation du dispositif de Müntz à double anneau qui est présentée dans cet article. Le dispositif automatisé permet dorénavant le suivi simultané de quatre réplicats, le maintien d'une charge constante ainsi que l'acquisition de données à un faible intervalle de temps.

**Mots clés :** conductivité hydraulique à saturation, double anneau, infiltrabilité

### Introduction

En hydrologie, la conductivité hydraulique à saturation ( $K_s$ ) d'un sol est un paramètre clé pour la détermination de la part de la pluie contribuant au ruissellement, et celle s'infiltrant. Néanmoins, ce paramètre peut localement présenter une variabilité spatiale importante liée aux propriétés du sol étudié (état de surface, porosité, tortuosité, etc.) et nécessite la réalisation de nombreuses mesures (réplicats) afin d'obtenir une bonne estimation de la valeur moyenne.

Parmi les méthodes d'acquisition de ce paramètre, nous nous intéressons ici aux méthodes de mesures *in situ*. Les trois principales méthodes décrites ci-dessous reposent sur le même principe : il s'agit de mesurer l'évolution au cours du temps du flux d'infiltration d'eau dans le sol dans des conditions expérimentales fixées. Ce flux d'infiltration, initialement fort, va décroître et va se stabiliser à une valeur finale que l'on pourra relier à la conductivité hydraulique à saturation. Les méthodes diffèrent par leur technicité, la structure de l'infiltration générée (unidimensionnelle verticale ou tridimensionnelle) et par la nature des équations utilisées pour traiter les données.

La méthode de Porchet consiste à mesurer, à l'intérieur d'un trou de surface et de profondeur connues que l'on remplit d'eau, le flux d'infiltration (Roederer, 1956). Tout au long de l'essai, l'expérimentateur ajoute à pas de temps donné le volume d'eau nécessaire au maintien de la hauteur d'eau initiale dans le trou. Le volume d'eau infiltré entre deux remplissages est alors égal au volume d'eau ajouté. En dépit de sa simplicité, cette méthode ne permet pas de conserver l'état de surface du site d'étude, et par conséquent, d'apprécier sa contribution à la variabilité spatiale du terme  $K_s$ . De plus, le dispositif expérimental utilisé conduit à une infiltration tridimensionnelle, ce qui nécessite la mise en œuvre d'équations complexes pour la détermination du paramètre  $K_s$ .

---

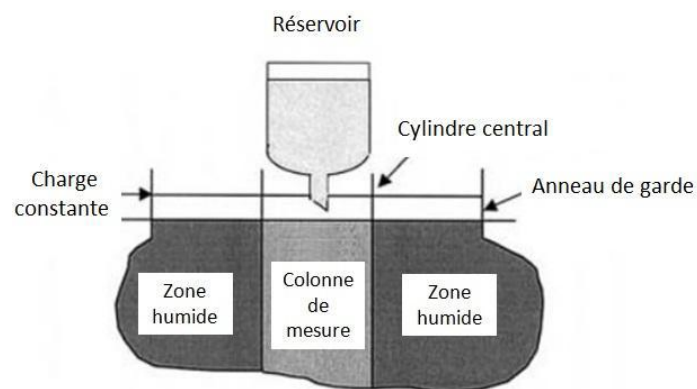
<sup>1</sup>INRA, UMR 1221 Laboratoire d'études des Interactions Sol, Agrosystème, Hydrosystème, F-34060 Montpellier cedex 1, France  
[garnierf@supagro.inra.fr](mailto:garnierf@supagro.inra.fr)

Un autre dispositif couramment employé pour la mesure *in situ* de la conductivité hydraulique des sols est l'infiltromètre à disques (Clothier et White, 1981). Il consiste à mesurer le flux d'infiltration de l'eau à travers un disque (membrane de porosité connue) dont le potentiel à l'interface disque/sol est constant au cours du temps et prédéterminé par l'utilisateur. L'intérêt de cet appareillage réside dans sa capacité à mesurer la conductivité hydraulique du sol à différents potentiels avoisinants la saturation. Cependant, la mise en œuvre est délicate et la fiabilité de la mesure repose sur un parfait contact entre le sol et la membrane (Coquet et al., 2000) rendant inadéquante l'utilisation de ce dispositif sur des surfaces trop rugueuses ou non planes.

Le principe de la méthode de Müntz (Colombani et al., 1972), également appelée double anneaux, est de mesurer l'évolution de l'infiltration au cours du temps d'une lame d'eau sous charge constante, s'infiltrant verticalement dans le sol (Boivin, 1990). Le dispositif est schématisé **Figure 1**. Une charge constante est établie à l'intérieur d'un cylindre de mesure enfoncé dans le sol à quelques centimètres de profondeur. Une même charge est maintenue dans un anneau de garde concentrique dont le rôle est d'assurer l'humectation latérale du sol. La charge est maintenue constante durant toute la durée de l'expérimentation, qui peut durer plusieurs heures : l'expérimentation s'arrête lorsque le régime permanent a été établi, c'est à dire lorsque le flux d'infiltration devient constant. La présence de l'anneau de garde permet d'assimiler le flux d'infiltration dans le cylindre central à un écoulement vertical dans le sol, autorisant alors un traitement des données avec des équations d'infiltration plus simples que dans le cas d'une infiltration tridimensionnelle.

Cependant, le dispositif classiquement utilisé et illustré **Figure 1** présente certains inconvénients :

- difficulté à maintenir une charge constante durant toute la durée de l'expérimentation,
- suivi fastidieux de l'essai et faible précision des mesures lorsque celles-ci sont relevées manuellement,
- suivi de plusieurs réplicats délicat par un seul opérateur.



**Figure 1** . Vue en coupe du dispositif de Müntz.

Source : Mathieu et Lozet, 2011

Pour l'ensemble des contraintes énoncées ci-dessus et en raison d'impératifs expérimentaux spécifiques à l'étude de l'infiltrabilité des fonds de fossés agricoles, l'UMR LISAH (INRA Montpellier) a procédé à une automatisation du dispositif de Müntz. Celui-ci autorise désormais le suivi simultané de quatre réplicats et permet le maintien d'une charge constante ainsi que l'acquisition de données de qualité à un faible intervalle de temps.

## Description du dispositif de Müntz automatisé

Dans la suite de l'article, le terme « module » désigne un dispositif de mesure composé de trois « blocs » (cylindres, électrique et réservoirs).

## Principe de fonctionnement

L'automatisation proposée pour la mesure de la conductivité hydraulique à saturation à partir de la méthode de Müntz repose sur :

- un remplissage automatisé des anneaux (de mesure et de garde) garantissant le maintien d'une charge constante en fonction de l'infiltration ;
- la mesure automatique des volumes infiltrés.

Pour ce faire, le niveau d'eau dans les anneaux est contrôlé au moyen de capteurs capacitifs fixés sur chacun d'eux et permettant le remplissage unique de l'un des anneaux à partir d'un réservoir attitré. Tout au long de l'essai, une sonde Diver® placée au fond du réservoir alimentant le cylindre central permet l'acquisition automatique des hauteurs d'eau infiltrées.

## Bloc « cylindres »

Les anneaux (**Figure 2**) sont faits avec une tôle en inox brut soudée de deux millimètres d'épaisseur, de 15 cm de largeur et biseautée à la base. Le choix du diamètre des anneaux doit être raisonné d'une part en fonction des caractéristiques morphologiques du site de mesure et d'autre part doit respecter un ratio le plus grand possible entre le diamètre de l'anneau de garde par rapport à l'anneau de mesure pour garantir la verticalité des écoulements sous l'anneau de mesure. Dans le cas spécifique de notre application dans des fossés, nous avons utilisé des anneaux de 30 et 10 cm de diamètre, respectivement pour l'anneau de garde et l'anneau de mesure.

Pour chaque module, le niveau de l'eau dans les cylindres est contrôlé par deux capteurs capacitifs « Schneider XT 230 » (**Figure 2**) pouvant détecter la présence de plusieurs types de matériaux : eau, sol, bois , etc... et avec lesquels on peut régler la sensibilité donc la distance de détection prise ici à 1,5 cm. Les capteurs sont fixés sur une plaque en aluminium et plaqués sur l'anneau à l'aide d'une pince. Lorsque les capteurs capacitifs ne détectent plus l'eau, un signal électrique est envoyé au bloc électrique permettant ainsi le remplissage des cylindres jusqu'au retour à son niveau initial.

## Bloc « électrique »

Ces deux détecteurs sont reliés à deux relais « Finder 553490120040 » embrochés sur une embase « Finder 9404SMA » et logés dans un boîtier étanche « Schneider SCHXT230A1PA » (**Figure 3**).

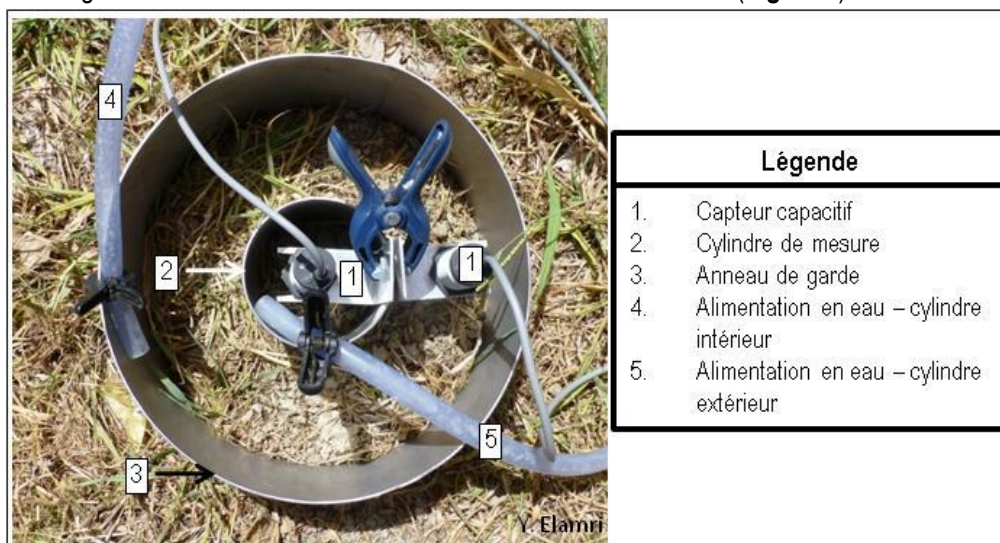


Figure 2 . Photo du bloc "cylindres" ; photo Y. Elamri).

Ces deux relais commandent deux électrovannes dont les caractéristiques sont :

- alimentation 12 Volts continu ;
- position normalement fermée ;
- diamètre 3/8<sup>e</sup> de pouce.

L'ensemble est alimenté par une batterie 12 Volts 75 Ah (une batterie pour deux modules).

Les connections électriques entre les différents éléments (batterie-relais et relais-électrovannes) sont faites avec du câble 3\*1,5mm<sup>2</sup>.

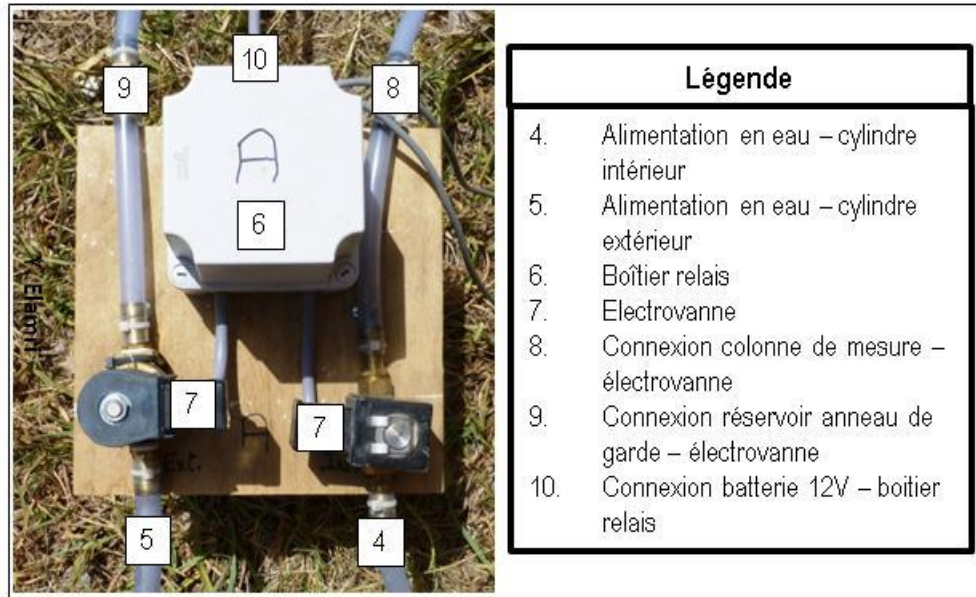


Figure 3 . Photo du bloc "module électrique" ; Photo Y. Elamri).

### Bloc « réservoirs »

L'alimentation en eau est faite à partir d'un tube en PVC écoulement, diamètre 20 cm, hauteur 100 cm avec un bouchon collé à la base, pour l'anneau de garde et d'un tube en PVC transparent, diamètre extérieur 63 mm, hauteur 170 cm obturé à la base par un bouchon PVC pression collé, pour l'alimentation de l'anneau central. Le PVC transparent permet une lecture aisée des variations des hauteurs d'eau à l'aide d'un mètre fixé le long du tube (Figure 4).

Les connections hydrauliques sont faites avec du tuyau souple transparent « Cristal » de 12 mm de diamètre et d'embouts cannelés d'un diamètre de 12 mm.

L'enregistrement des variations des hauteurs d'eau, dans la colonne alimentant l'anneau central, se fait avec une sonde « Diver-mini® » (Schlumberger) suspendue au fond de la colonne avec un fil inox de 1 mm de diamètre (Figures 4 et 5). Les sondes de type « Diver » sont des capteurs de pression absolue : elles vont donc être sensible à la fois aux variations de hauteur d'eau dans le réservoir et aux variations de la pression atmosphérique qui s'exerce à la surface du réservoir. En toute rigueur, il faudrait donc corriger les données mesurées par ces sondes des variations de la pression atmosphérique. Nous avons considéré que la pression atmosphérique restait constante durant toute la durée de l'expérimentation, ce qui semble raisonnable du fait de sa faible valeur (durée typique : 2h30). Dans le cas contraire, il faudrait une sonde de type « BARO-Diver » qui enregistre les

variations de la pression atmosphérique. La paramétrisation, le lancement de l'acquisition et la récupération des données se fait à l'aide du logiciel « Logger Data Manager 5 » vendu avec les Diver®.

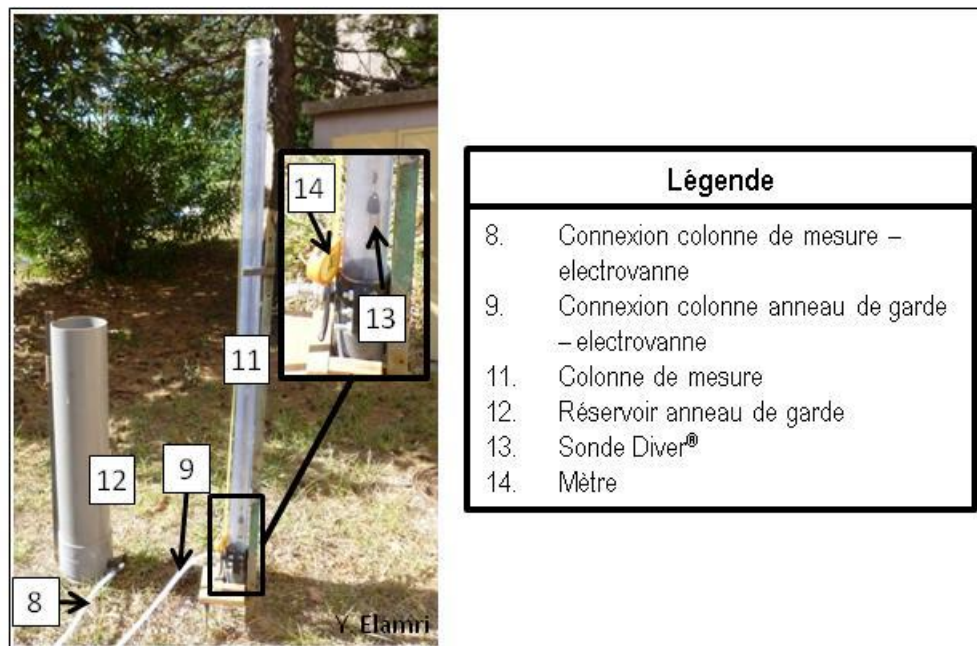


Figure 4 . Photo du bloc "réservoirs" ; (photo Y. Elamri).

## Protocole

### Installation et mise en eau du dispositif

Tout d'abord, les anneaux sont enfoncés à une profondeur de 5 cm environ en prenant soin de perturber le moins possible la surface du sol.

Les capteurs capacitifs reliés au module électrique sont ensuite fixés aux anneaux à l'aide d'une pince (**Figure 2**). La hauteur d'installation des capteurs capacitifs pour assurer le maintien d'une charge de 3 cm à l'intérieur des cylindres est réalisée grâce à une calle en bois de 4,5 cm de hauteur (ceci correspond à la hauteur de la lame d'eau 3 cm plus la distance de détection de l'eau par les sondes capacitives 1,5 cm) placée sous le capteur capacitif.

Puis, les tuyaux souples (à l'aval des électrovannes) permettant le remplissage des cylindres sont fixés à l'aide d'une pince en prenant soin qu'ils n'éclaboussent pas le capteur et qu'ils créent le moins de vagues possible lors des remplissages successifs.

Enfin, après remplissage et branchement des réservoirs aux électrovannes, la sonde Diver® est placée au fond de la colonne de mesure (**Figure 4 et 5**) et la hauteur d'eau initiale est relevée par l'opérateur.

L'installation des différents répliqués doit être faite de façon à laisser les colonnes de mesures accessibles, notamment pour la réalisation d'un relevé « opérateur » durant l'essai.

Le lancement de l'essai débute par la mise en eau du dispositif en versant un volume suffisant pour une mise en charge instantanée des anneaux (0,23 L pour le cylindre central et 1,9 L pour l'anneau de garde). La mise en

charge est d'abord faite dans l'anneau de garde avant d'être réalisée dans le cylindre central. Dès lors que les deux cylindres sont en eau, le module électrique est branché à la batterie et le chronomètre lancé.

### Suivi de l'expérience

Durant les premières minutes de l'expérience, il est important de vérifier l'installation du dispositif. Cette vérification a pour but de s'assurer : i) de l'absence de fuite autour des cylindres ; ii) de la charge de chacun des cylindres ; iii) du « bon » fonctionnement des capteurs capacitifs.

En cas de dysfonctionnement de l'un des capteurs, il faut vérifier que ce dernier ne soit pas mouillé, gêné par des débris végétaux ou encore mal orienté. Dans cette dernière configuration, il arrive généralement que la détection de la paroi de l'anneau de mesure empêche le remplissage du cylindre concerné.

Après vérification du dispositif, l'opérateur relève la hauteur d'eau contenue dans la colonne de mesure des différents répliqués à pas de temps régulier (10 - 15 min). Bien que chacune des colonnes de mesures soit équipée d'une sonde Diver® enregistrant la hauteur d'eau toutes les 10 s, le relevé « opérateur » permet à la fois de vérifier les données acquises par la sonde ainsi que de déterminer l'arrêt de l'essai. Celui-ci est marqué par l'atteinte du régime permanent que nous avons défini comme la répétition d'un même volume infiltré entre quatre mesures « opérateur » successives.

Lors de l'essai, le niveau des réservoirs doit être attentivement surveillé. Si nécessaire, le remplissage des réservoirs alimentant les anneaux de garde peut être réalisé sans précaution particulière. Cependant, en ce qui concerne les réservoirs dédiés aux cylindres de mesures, le temps auquel est réalisé le remplissage ainsi que les niveaux d'eau (avant et après) doivent être relevés.

L'arrêt de l'expérience se fait en notant le temps de fonctionnement du dispositif lors du débranchement de la batterie.

### Prétraitement des données

Le prétraitement des données présenté ci-dessous a pour but de convertir le relevé de hauteur d'eau réalisé dans la colonne de mesure en une courbe d'infiltration cumulée à l'intérieur du cylindre de mesure à partir de laquelle la conductivité hydraulique à saturation pourra être estimée au moyen d'équations d'infiltration simples.

Après avoir détecté le début et la fin de l'essai sur le fichier issu de la sonde Diver®, il est nécessaire de transformer le relevé de hauteur d'eau sur lequel le remplissage du réservoir apparaît en un relevé « continu ». Ensuite, les différences de hauteurs d'eau peuvent être sommées pour obtenir la courbe d'infiltration cumulée (**Annexe 1**) en tenant compte de la différence entre la section du réservoir et celle de l'anneau de mesure. A ce stade, nous conseillons donc de procéder au lissage<sup>2</sup> de la série de données afin de :

- linéariser les données acquises dans la colonne de mesure (hystérésis au déclenchement de la sonde capacitive) ;
- compenser le bruit de la mesure.

---

<sup>2</sup> Fonction *smooth.spline* du logiciel R ([www.r-project.org](http://www.r-project.org))

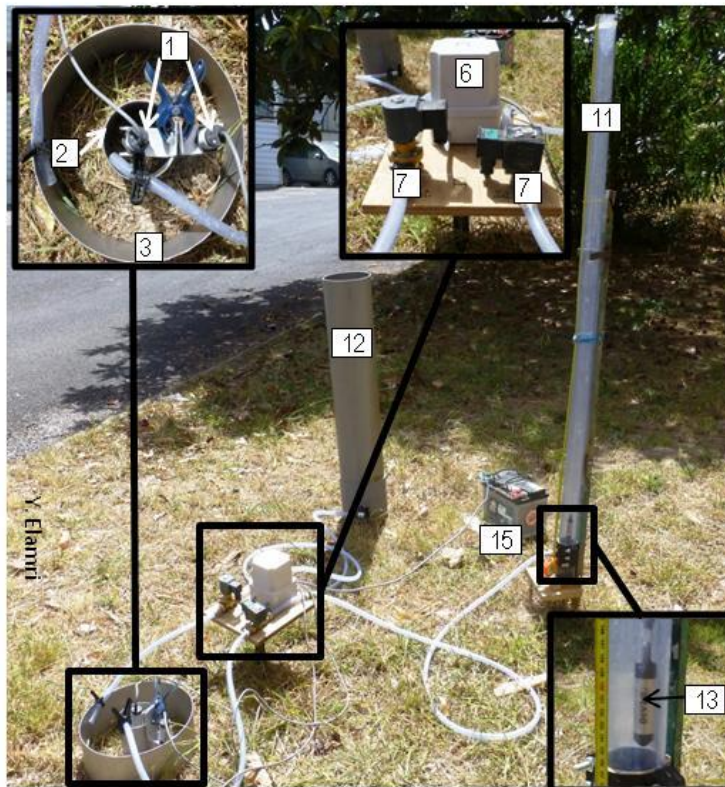
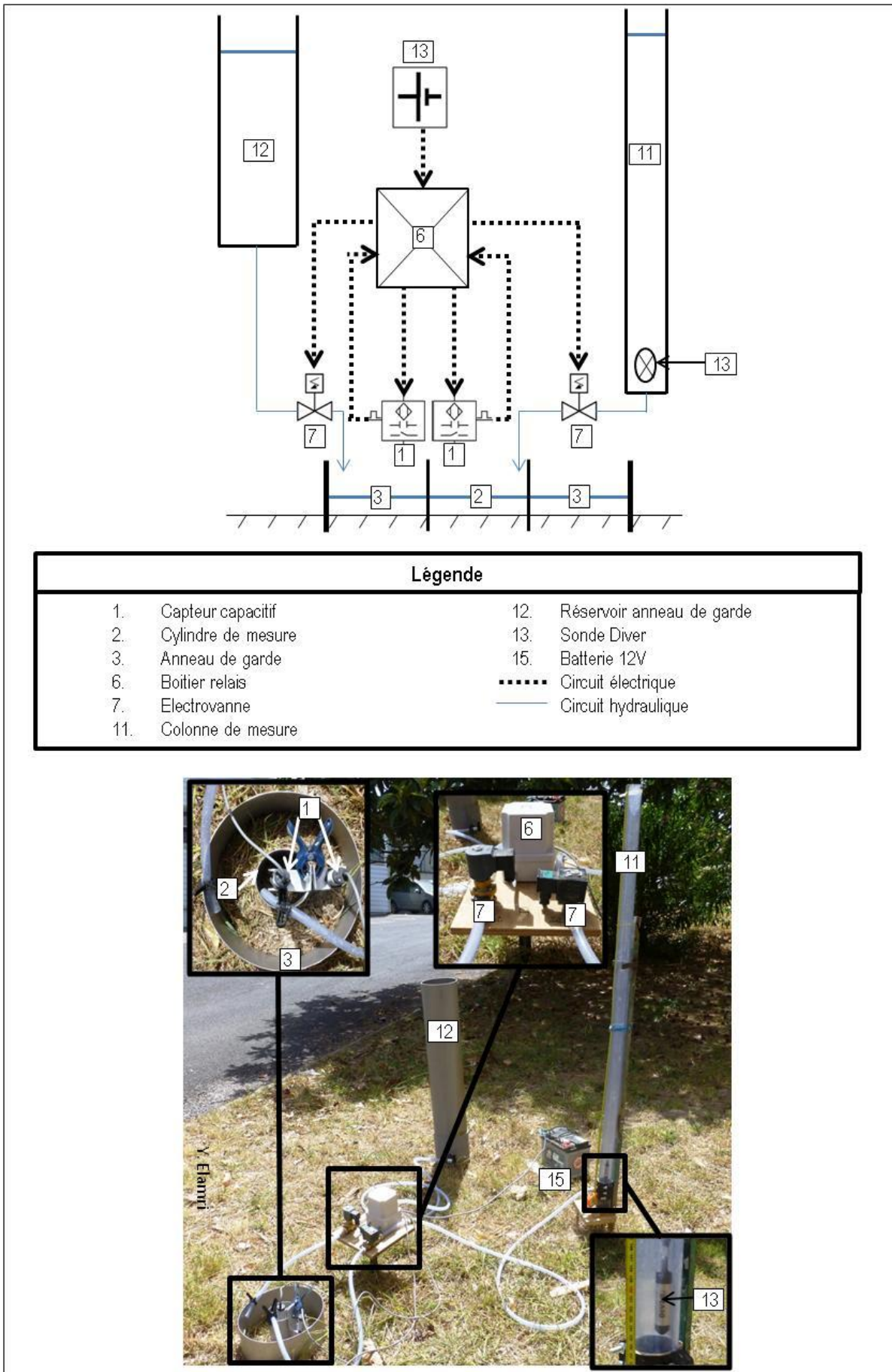
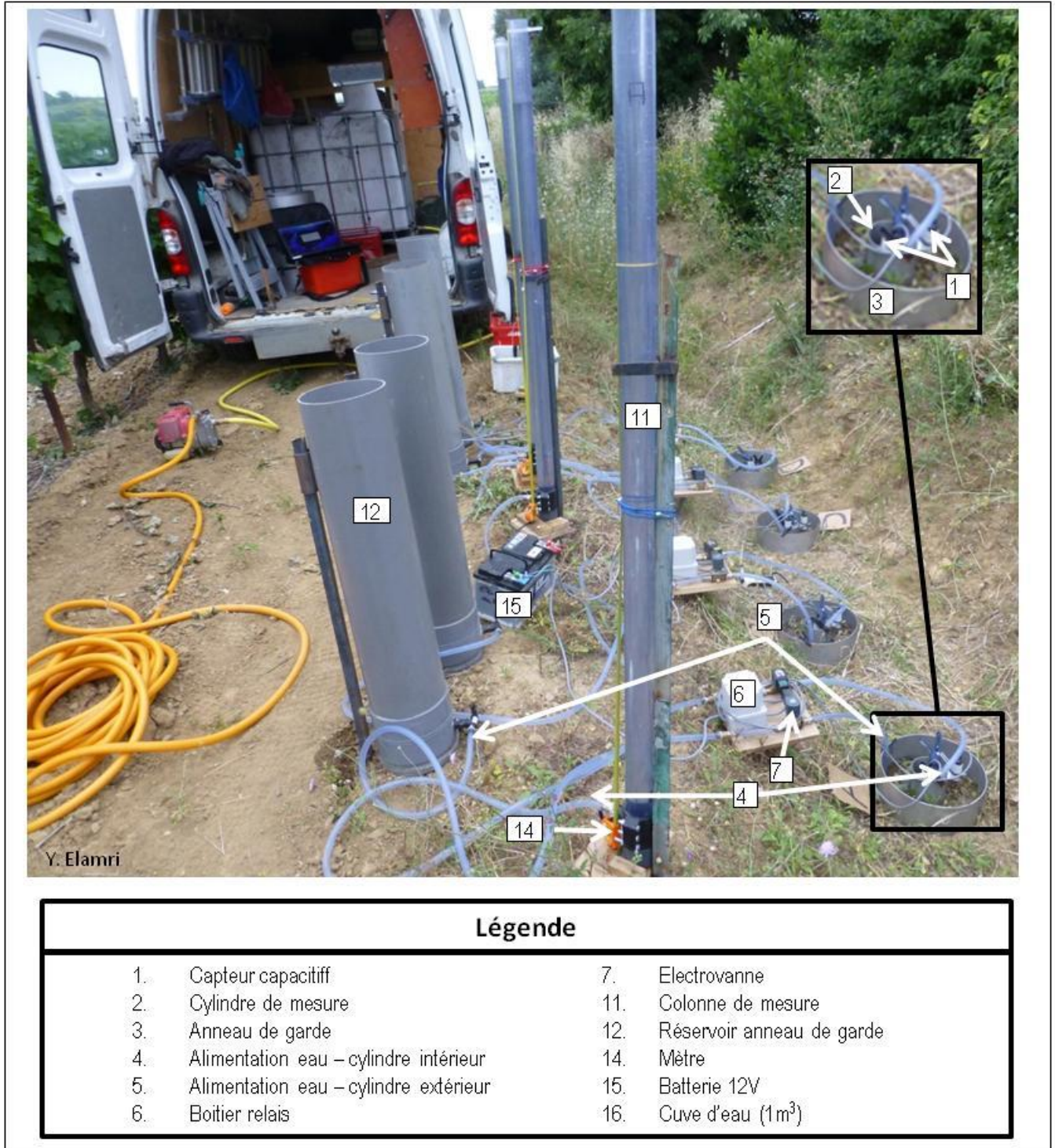


Figure 5 . Schéma et photo du dispositif automatisé ;( photo Y. Elamri).

## Mise en œuvre

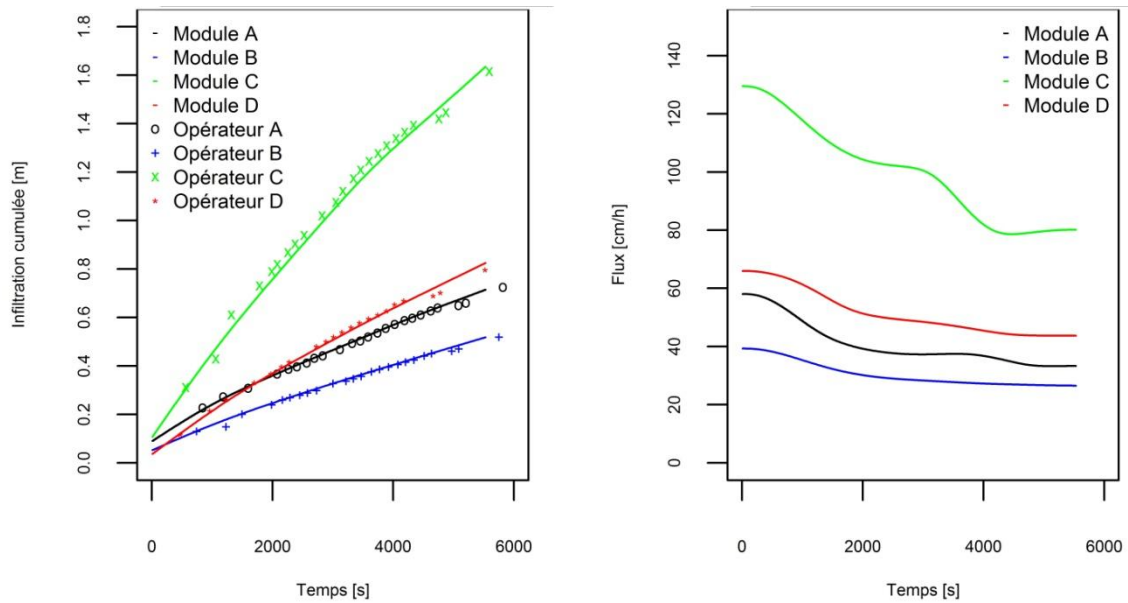
Le dispositif automatisé tel que présenté précédemment a été utilisé à l'occasion de deux campagnes de mesure de l'infiltrabilité des fonds de fossés agricoles. A l'échelle de notre site d'étude (bassin versant de Roujan [Hérault, France]), la conductivité hydraulique à saturation de neuf fossés a été mesurée. Pour chacun d'eux, quatre répliqués espacés de 50 cm ont été installés (**Figure 6**). Equipés d'une cuve (1m<sup>3</sup>) pour l'alimentation en eau, il a été possible d'expérimenter deux sites par jour à raison de 3h30 par site (1h installation/rangement – 2h30 mesure).



**Figure 6.** Installation du dispositif automatisé dans un fossé agricole (photo Y. Elamri).



L'essai d'infiltrabilité présenté **Figure 7** a été réalisé 25 avril 2013 entre 10h00 et 13h00 (TU) et suivi par deux opérateurs. On constate que les données acquises par la sonde Diver® sont cohérentes au vu du relevé « opérateur ».



**Figure 7.** Evolution de l'infiltration cumulée et du flux au cours du temps.

L'interprétation des courbes d'infiltration cumulée (**Figure 7**) obtenues lors de cet essai a été faite par la loi de Darcy (équation 1). Classiquement employée pour le dépouillement d'essais de Müntz, elle permet de déterminer le paramètre  $K_s$  en régime permanent sous l'hypothèse d'un gradient de charge  $i$  égal à 1. Les résultats obtenus sont présentés dans le **Tableau 1**.

**Équation 1 : Loi de Darcy [1856]**

$$Q = A \times K_s \times i$$

Avec : Q le débit s'écoulant à travers le profil de sol [m<sup>3</sup>/s]

A la surface du cylindre central [m<sup>2</sup>]

$K_s$  la conductivité hydraulique à saturation [m/s]

$i$  le gradient de charge [-]

**Tableau 1 .** Conductivité hydraulique à saturation  $K_s$ .

	Module A	Module B	Module C	Module D
$K_s$ (cm/h)	33,5	26,7	79,5	43,8
log ( $K_s$ )	1,52	1,43	1,90	1,64

Les valeurs de  $K_s$  obtenues (**Tableau 1**) à l'échelle du tronçon de fossé expérimenté (2 à 3 m environ) justifient l'installation des différents réplicats du fait de l'importante variabilité observée ( $\overline{\log(K_s)} = 1.62$  et  $\sigma = 0.20$ ).

## Conclusion

Dans le cadre, d'une étude de l'influence de l'état de surface sur l'infiltrabilité des fonds de fossés agricoles, l'UMR LISAH a procédé à une automatisation du dispositif de Müntz. Cette automatisation innovante nous a

## François Garnier, Yassin Elamri

permis de répondre aux exigences suivantes : i) mise en œuvre sur sites accidentés ; ii) suivi simultané de quatre répliqués ; iii) acquisition de données à faible intervalle de temps.

L'innovation majeure du dispositif proposé réside dans le maintien d'une charge hydraulique constante ( $\pm 2$ mm) à l'intérieur des cylindres rendu possible par l'usage des détecteurs capacitifs. Dans l'objectif d'un suivi fin du processus d'infiltration, l'utilisation des sondes Diver® permettant une acquisition précise de données à grande fréquence est recommandée. Pour une simple caractérisation de la conductivité hydraulique à saturation, le suivi opérateur suffit à la détermination de ce paramètre par la loi de Darcy tout en conservant un même niveau de fiabilité sur la mesure.

Employés à l'occasion de deux campagnes de mesures comprenant chacune neuf sites, ce dispositif a permis de répondre à l'ensemble des contraintes liées à l'étude. Néanmoins, un lissage des courbes d'infiltration est nécessaire avant leur interprétation afin de réduire le bruit de la mesure.

## Remerciements

Ce travail est soutenu par le projet FIP (convention ONEMA-INRA). Les auteurs remercient Cécile Dagés pour la relecture et la critique constructive du document et également les collègues de l'UMR SAS de l'INRA de Rennes pour nous avoir permis de récupérer des équipements dont ils n'avaient plus besoin (électrovannes, capteurs capacitifs).

## Références bibliographiques

Boivin P (1990) Caractérisation de l'infiltrabilité d'un sol par la méthode Muntz : variabilité de la mesure. *Bulletin Réseau Erosion*, n° 10 : 14-24.

Clothier B E, White I (1981) Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. *Soil Sci Soc Amer J* **45** (2): 241-245.

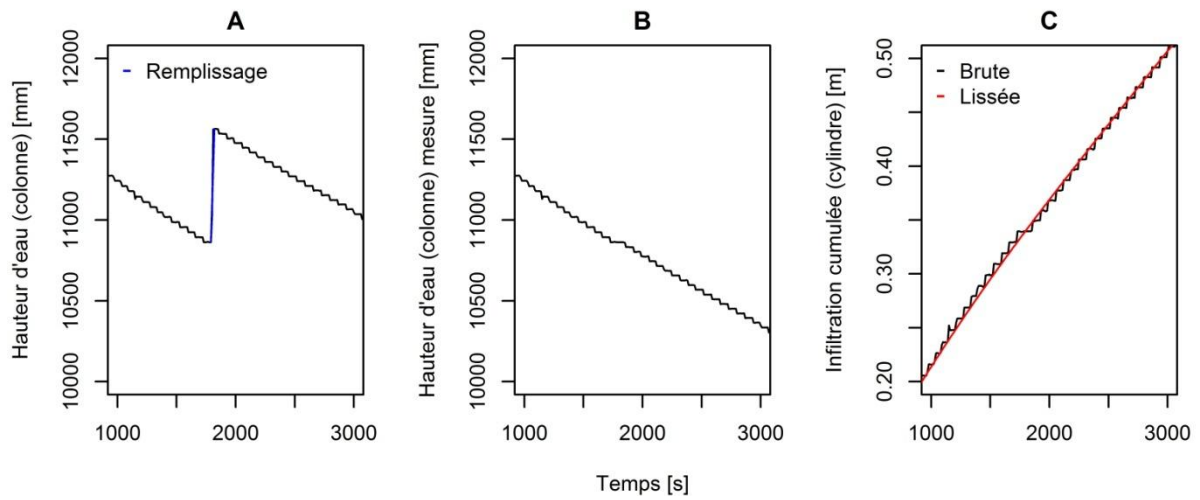
Colombani J, Lamagat J-P, Thiebaut J (1972) Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode Muntz, une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. *Cahier de l'Orstom* **9** (3): 15-46.

Coquet Y, Boucher A, Labat C, Vachier P, Roger-Estrade J (2000) Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques. *Etude et Gestion des Sols* **7** (1): 7-24.

Mathieu C, Lozet J (2011) *Dictionnaire encyclopédique de science du sol*. Lavoisier.

Roederer P (1956) Perméabilité des sols (méthode Porchet) d'après MM. de Beaucorps, de Chevron-Villette, Langle, Pujos et Roederer : méthodes recueillies par M. Roederer.

Annexe 1 : Prétraitement des données Diver



**A** : données brutes – **B** : suppression des phases de remplissages – **C** : infiltration cumulée brute et lissée

Annexe 2 : éléments du dispositif automatisé (1 module)

N°	Dénomination	Prix unitaire (HT)	Nb	Prix total (HT)	Commentaires	Fournisseur
<b>1</b>	Capteur capacitif	75,08 €	2	150,16 €	Réf. SCHXT230A1PAL2	Rexcel
<b>2</b>	Cylindre inox Ø 100mm	48,50 €	1	48,50 €	Cylindre central	SOTEC SOMO
<b>3</b>	Cylindre inox Ø 300mm	48,50 €	1	48,50 €	Anneau de garde	SOTEC SOMO
<b>4-5</b>	Tuyaux en PVC souple	3 €	2,5m	7,50 €		Castorama
<b>6</b>	Boîtier électrique étanche	16,28 €	1	16,28 €	Réf. SCHNSYTBS111113H	Rexcel
<b>7</b>	Electrovanne	74,88 €	2	149,76 €	12V continu 3/8" NF sans pression différentielle	LRI Montpellier
<b>10</b>	Câble électrique 3*1,5	1,54 €	7,5m	11,55 €	Connections entre batterie, relais et électrovannes	Castorama
<b>11</b>	Tube PVC écoulement transparent diamètre 6,3 cm (H 1,7 m) avec bouchon et collier de prise en charge	54,60 €	1	54,60 €	Réservoir central de mesure	Point Plastique
<b>12</b>	Tube PVC écoulement diamètre 20 cm (H 1 m) avec bouchon et robinet de sortie	43,28 €	1	43,28 €	Réservoir anneau de garde	Point Plastique
<b>15</b>	Batterie 12V	100	0,25	25 €	On peut utiliser une batterie pour 4 modules	Midi Batterie
17	Pince	1 €	3	3 €	Fixation capteur + tuyaux	Castorama
18	Relais plus support relais	17,65 €	2	35,30 €	Réf. FID5534901120040 et FID9404SMA	Rexcel
19	Divers (raccords et embouts en laiton, fixations, mètre,,)			25 €		
<b>TOTAL</b>				<b>618 €</b>		

A ces 618 €, il faut ajouter une sonde DIVER (N°13) de 595 €. Mais celle-ci n'est pas utilisée spécifiquement pour ce dispositif.

Les numéros de pièce en rouge font référence à la **Figure 6**. Les numéros de pièce en noir font référence aux photos ci-dessous.

