

Fiabilisation des mesures réalisées avec le dispositif des tables à succion

Bernadette Thomas¹

Technicienne en instrumentation scientifique dans le laboratoire de caractérisation hydrodynamique des sols à l'unité Emmah d'Avignon, elle est en charge des mesures de conductivité hydraulique (Méthodes Wind et Ksat), de certaines activités de métrologie : étalonnage des boîtiers Wind et des Vacuomètres, contrôle des tables à succion et de la préparation de montages pour des expérimentations spécifiques avec des capteurs et des centrales d'acquisition Campbell.

Bernadette.thomas@inrae.fr



Résumé. La courbe de rétention hydrique est un paramètre clé du comportement des sols qui décrit sa capacité à retenir l'eau. De nombreux dispositifs expérimentaux peuvent être utilisés pour obtenir cette courbe, dont la table à succion, elle permet d'appliquer une succion sur des échantillons de sol. En appliquant des succions successives de 0 à 0.1 bar et en mesurant à chaque fois la teneur en eau du sol, on obtient une partie de la courbe de rétention. Des bulles d'air cachées dans le circuit hydraulique de ce dispositif de mesures peuvent engendrer de fortes erreurs de mesure. Nous avons conçu un boîtier électronique nommé vacuomètre. Il est muni d'un capteur de pression et il affiche la succion exercée par la table au niveau des échantillons pour s'assurer que la succion imposée à une extrémité du circuit hydraulique est bien transmise à l'échantillon de sol. En enregistrant en continu la succion transmise à l'échantillon, ce dispositif fiabilise les mesures réalisées avec le dispositif. Il s'insère dans la politique qualité de l'unité et la fiabilisation des méthodes utilisées.

Mots clés : fiabilisation des méthodes, table à succion, démarche qualité, rétention hydrique, vacuomètre, capteur de pression, teneur en eau, potentiel.

Abstract. The curve of hydric retention is a key parameter of the soils behaviour that describes its capacity to retain water. Numerous experimental devices can be used to obtain this curve such as sucking table. It allows to apply a sucking on soil samples. When applying different sucking and measuring each time soil water capacity, we obtain a part of retention curve. Some air bubbles hidden in the hydraulic circuit of this measuring device can generate high errors of measure. We have implemented an electronic box called vacuometer. It is fitted with a pressure sensor and displays the sucking made by the table at the sensor level to ensure that the sucking at one extremity of the hydraulic circuit is correctly transmitted to the soil sample. When recording in continuous flow the

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

sucking transmitted to the sample, this device relies on the measures realized. The quality reference of the laboratory is matched with it and the methods used are reliable.

Keywords. Methods fiabilisation, sucking table, quality regulation, hydric retention, vacuumeter, pressure sensor

Introduction

Le sol est un milieu poreux qui est capable à la fois de retenir l'eau et de la laisser s'écouler, par exemple en profondeur vers les aquifères. L'humidité d'un sol, ou teneur en eau (exprimée en volume d'eau par volume de sol, $m^3 m^{-3}$) varie au cours du temps entre la saturation du sol et la teneur en eau minimale appelée teneur en eau résiduelle. Plus le sol est sec, plus l'eau restant dans le sol est retenue fortement dans le sol et moins l'eau restante est mobile et disponible pour les plantes. La saturation d'un sol est obtenue quand les pores du sol sont entièrement comblés par de l'eau. Un sol n'est saturé que de façon transitoire. La capacité au champ est la capacité d'un sol à retenir l'eau de façon durable, l'eau présente dans les pores de plus grande taille s'est évacuée par drainage sous l'effet de la gravité et seule l'eau comblant les pores de taille intermédiaire et de petite taille reste présente, retenue par des forces capillaires. Lorsque le sol se dessèche, sa teneur en eau diminue jusqu'à atteindre le point de flétrissement permanent, les forces qui retiennent l'eau dans le sol deviennent alors supérieures à la capacité des plantes à extraire cette eau par leurs racines, les plantes ne peuvent plus prélever d'eau. La quantité d'eau retenue dans le sol entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent est l'eau utile pour les plantes et définit la « réserve utile du sol ». Ce sont des données importantes en agriculture, elles permettent de régler l'irrigation d'un sol. Pour chaque sol, il existe une fonction qui relie la teneur en eau du sol aux forces qui retiennent l'eau dans le sol. Cette fonction s'appelle la courbe de rétention hydrique, qui est une des courbes caractéristiques du sol déterminées au sein de l'UMR EMMAH.

Pour déterminer la courbe de rétention hydrique nous utilisons plusieurs dispositifs de mesure en fonction de la gamme d'humidité, des tables à succion qui font l'objet de l'article pour les mesures entre la saturation et la capacité au champ, des presses de Richards entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent et un psychromètre (dispositif à point de rosée) le WP4C pour des milieux très secs entre le point de flétrissement permanent et la teneur en eau résiduelle.

La méthode de mesure utilisant les tables à succion est régie par la norme ISO 11274 : Qualité du sol — Détermination de la caractéristique de la rétention en eau — Méthodes de laboratoire. Un échantillon de sol est posé à la surface de la table à succion. On impose ensuite une série de succions et on mesure l'humidité de l'échantillon de sol pour chaque succion. Entre chaque succion il est nécessaire d'atteindre l'équilibre, cet équilibre est obtenu quand l'humidité dans le sol ne varie plus au cours du temps pour une succion donnée.

La succion appliquée avec les tables à succion est transmise par un système hydraulique dont une partie est visible et une autre partie, située dans la table, est invisible. Des bulles d'air peuvent être piégées dans la partie invisible. La succion n'étant pas mesurée au niveau de l'échantillon, seul un régleur nous indique la valeur qui est supposée être appliquée. Ces bulles peuvent fausser la mesure car la succion qui sera effectivement transmise à l'échantillon de sol sera plus faible (mais on ne sait pas dans quelle proportion) que la succion imposée, cela génère une erreur impossible à quantifier. Il était nécessaire de concevoir un dispositif permettant de fiabiliser la mesure en s'assurant que la succion imposée était effectivement transmise jusqu'à l'échantillon.

Dans le cadre de la démarche qualité de l'unité, une première réflexion a été initiée par Franck Tison, électronicien dans l'unité, sur la conception d'un prototype pour fiabiliser les mesures obtenues avec une table à succion. Ce projet a été le sujet d'un BTS par alternance dont il a été le responsable du projet, la tutrice étant Nathalie Moitrier, de la plateforme de modélisation, Sol Virtuel de l'unité. Ce prototype, appelé Vacuumètre, dont le composant

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2021 (103)

essentiel est un capteur de pression, est installé sur la table à succion, il affiche la succion exercée au niveau de l'échantillon et envoie les données à un PC pour qu'elles soient enregistrées dans des fichiers de sauvegarde. Nous l'étalonnons dans l'unité avec un générateur de pression (DRUCK DPI 602) raccordé COFRAC (Comité français d'accréditation) Etalonnage N°2-1771 Pression.

Dans un premier temps quelques définitions vous seront données. Ensuite, le matériel utilisé et le dispositif conçu dans ce projet vous seront présentés. Enfin, pour finir, un bilan complète cet article : il présente les résultats sur le fonctionnement, l'étalonnage, les problèmes rencontrés et si l'objectif attendu est atteint, à savoir, la table à succion qui va être utilisée est-elle fiable ou non ?

Quelques définitions

Teneur en eau d'un sol

C'est la quantité d'eau dans le sol exprimé en gr d'eau par gramme de sol sec ($g\ g^{-1}$) ou en volume d'eau par volume de sol apparent ($m^3\ m^{-3}$).

Pression

La pression est la force exercée par un fluide (gaz ou liquide) sur une surface. On peut l'exprimer en pascal (Pa), en bar (bar), en psi (pound per square inch), en mètre de colonne d'eau (m)...

$1Pa = 0.01mbar = 0.102mmH_2O = 0.000145psi$.

Potentiel matriciel

Les forces qui retiennent l'eau dans le sol sont essentiellement des forces capillaires et des forces d'adsorption et sont appelées « potentiel hydrique » ou « potentiel matriciel ». Elles s'expriment comme une pression relative à la pression atmosphérique et leur unité est le bar (b), le pascal (Pa) ou en « mètre de colonne d'eau » (m). L'eau retenue dans le sol est en dépression par rapport à la pression atmosphérique : le potentiel hydrique ou potentiel matriciel est donc inférieur à 0. Une unité anciennement utilisée est le « pF » qui correspond au logarithme décimal de la valeur absolue du potentiel matriciel exprimé en cm de colonne d'eau (exemple : une colonne d'eau de 1 m correspond à un potentiel matriciel -1 m soit -100 cm, et donc à un $pF = 2$ ($\log 100$)). Lorsque le sol est saturé, le potentiel hydrique est égal à 0 m. Lorsque le sol se dessèche le potentiel hydrique diminue. Le tableau ci-dessous donne des valeurs typiques de teneur en eau et de potentiel hydrique correspondant.

Etat du sol	Teneur en eau	Potentiel hydrique (mH ₂ O)
Sol saturé	Teneur en eau à saturation = porosité	0
Sol 48h après une forte pluie	Capacité au champ	Entre -0.3 et -3
Sol sec = stress hydrique irréversible pour les plantes	Point de flétrissement permanent	-160
Surface du sol en été en milieu méditerranéen	Légèrement supérieure à la teneur en eau résiduel	-10000

Tableau 1. Valeurs typiques de teneur en eau et de potentiel hydrique correspondant

Succion

La succion est l'opposée du potentiel matriciel, c'est l'énergie nécessaire pour extraire l'eau d'un sol. Le potentiel matriciel est négatif car il faut fournir de l'énergie, la succion est toujours positive. En somme, plus le milieu est sec, plus il retient l'eau et plus il faudra exercer d'énergie pour extraire l'eau restante de ce sol.

Courbe de rétention hydrique

La courbe de rétention hydrique (Figure 1) traduit la capacité du sol à retenir l'eau en fonction de son état de sécheresse. Elle est la relation entre le potentiel matriciel qui représente la « force » avec laquelle l'eau du sol est retenue dans le sol d'une part et l'humidité du sol d'autre part, soit la teneur en eau d'un sol en fonction de la pression exercée sur ce sol, cette pression appliquée étant l'équivalent de la succion imposée au sol.

Lors du dessèchement d'un sol, l'eau restante est liée de plus en plus fortement au sol, l'extraire requiert une énergie de plus en plus importante, ce qui, par exemple, peut amener les plantes à présenter un « stress hydrique ».

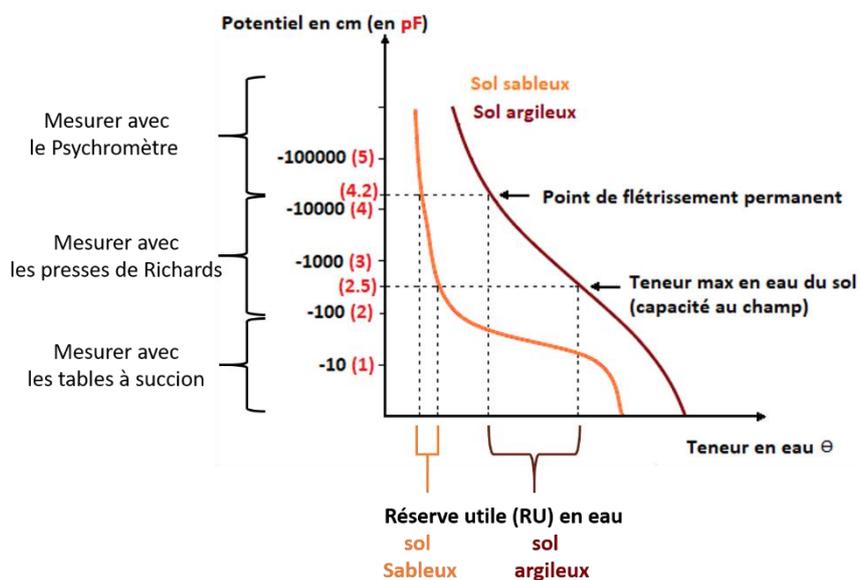


Figure 1 Courbe de rétention hydrique avec des points remarquables d'après Musy-Soutter

Description du matériel

La table à succion

Les tables à succion que nous avons au laboratoire sont fabriquées par Eijkelkamp et distribuées par SDEC France. Elles permettent d'imposer un potentiel matriciel qui s'apparente à une pression qui est exprimée en mètre (10 m=1 bar). Elles sont utilisées pour la gamme des faibles succions, typiquement entre 0 et 1 m.

La table à succion utilise le principe des vases communicants (Figure 2). Elle peut « assécher » ou « saturer en eau » un échantillon de sol.

Elle comprend un bac contenant du sable fin, ou de la silice ou du sable/kaolin, et des drains au fond du bac qui permettent de saturer en eau le sable. Ils sont raccordés par un tuyau souple à un réservoir d'eau mobile le long d'un réglet afin de pouvoir ajuster le niveau. La distance entre la surface du lit de sable et le niveau d'eau représente la succion.

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2021 (103)

La succion est donc transmise (en supposant la continuité hydraulique) à travers le tuyau souple, le drain, le sable saturé jusqu'aux échantillons de sol dont nous souhaitons connaître la courbe de rétention hydrique.

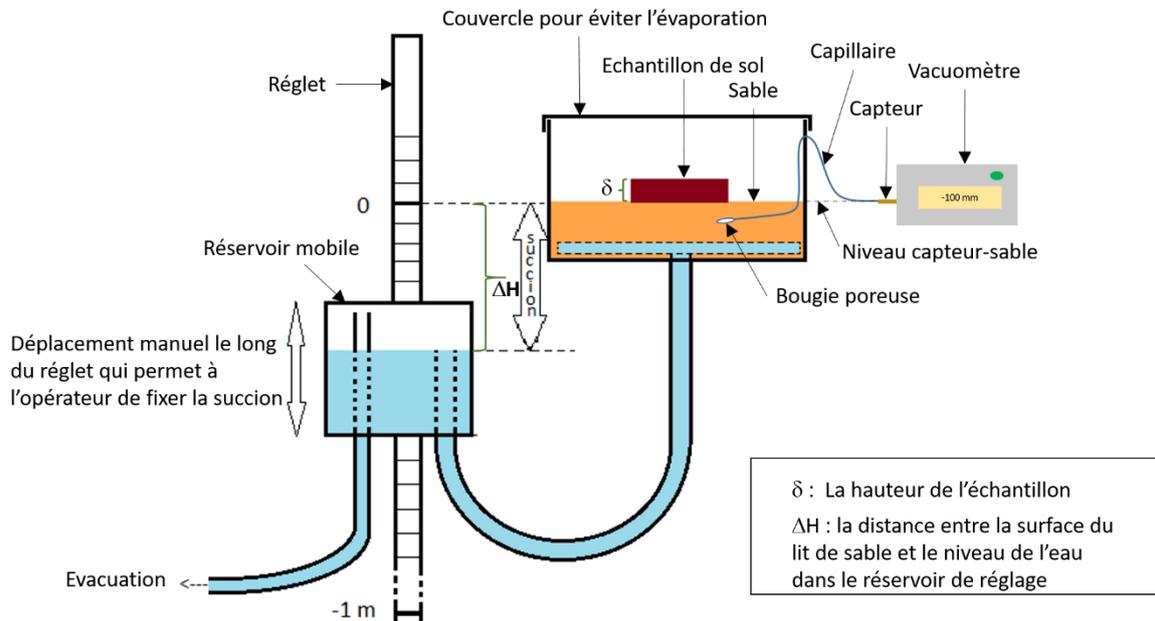


Figure 2 Schéma d'une table à succion avec son Vacuomètre

Dans les hypothèses où la succion au milieu de l'échantillon est la succion « de l'échantillon » et qu'on soit à l'équilibre hydrostatique entre le réservoir d'eau, le lit de sable et l'échantillon, la succion h au sein de l'échantillon de sol est : $h = \Delta H + \delta/2$.

Manipulation

Les échantillons de sol sont initialement saturés et ils se désaturent au fur et à mesure qu'un technicien déplace le réservoir vers le bas augmentant ainsi la succion. La valeur lue sur le régllet indique la succion exercée.

A chaque succion le technicien attend l'équilibre, entre trois jours et plus de deux semaines suivant l'échantillon et la succion, puis il effectue une pesée de l'échantillon.

L'objectif est d'obtenir une courbe de rétention hydrique, teneur en eau de l'échantillon par rapport à la succion exercée sur cet échantillon.

Après la fin des tests il est nécessaire de saturer la table à succion.

Le système peut parfois contenir des bulles d'air emprisonnées dans le sable ou dans le circuit hydraulique dont une partie n'est pas visible par l'opérateur. Dans ce cas la succion que l'on impose par le déplacement du réservoir et lue sur le régllet ne correspond plus à la succion réellement appliquée sur l'échantillon. Il s'est donc avéré nécessaire de trouver une solution pour contrôler cette succion.

Silice

Au laboratoire, nous utilisons des tables à succion contenant dans le bac de la silice broyée que nous achetons chez Sibelco. Elle ressemble à de la farine. Elle est classée STOT RE2 car elle contient entre 1 et 10 % de quartz

alvéolaire et son risque de danger est H373, risque présumé d'effets graves pour les poumons à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée par inhalation. Elle peut être responsable de la silicose. Tant qu'elle est humide il n'y a pas de problème. Mais elle doit être manipulée avec précaution pour éviter la génération de poussières et nécessite le port d'un masque FFP3, d'une blouse et de gants lorsqu'on la manipule à l'état sec, par exemple lorsque l'on met en place une nouvelle table à succion ou lorsque l'on nettoie la surface de la silice et qu'il est alors nécessaire de rajouter de la silice. Une fois les manipulations réalisées et la silice humide, le port du masque est inutile. Des dispositions ont été prises afin de limiter la génération de poussières comme le stockage dans des fûts fermés, étiquetés et difficilement ouvrables.

La chaîne d'acquisition

La succion est une grandeur physique, étant l'opposé du potentiel matriciel elle est analogue à une pression. Pour la mesurer et la traiter nous avons monté une chaîne d'acquisition, un transmetteur de la pression (bougie poreuse, capillaire et capteur de pression), un convertisseur analogique/numérique (CAN), un microcontrôleur (μC) et enfin une transmission vers un ordinateur (PC) pour permettre la communication via une Interface Homme/Machine (IHM) avec un utilisateur.

Le schéma ci-dessous (Figure 3) représente la table à succion et toute la chaîne d'acquisition de la bougie poreuse jusqu'au PC.

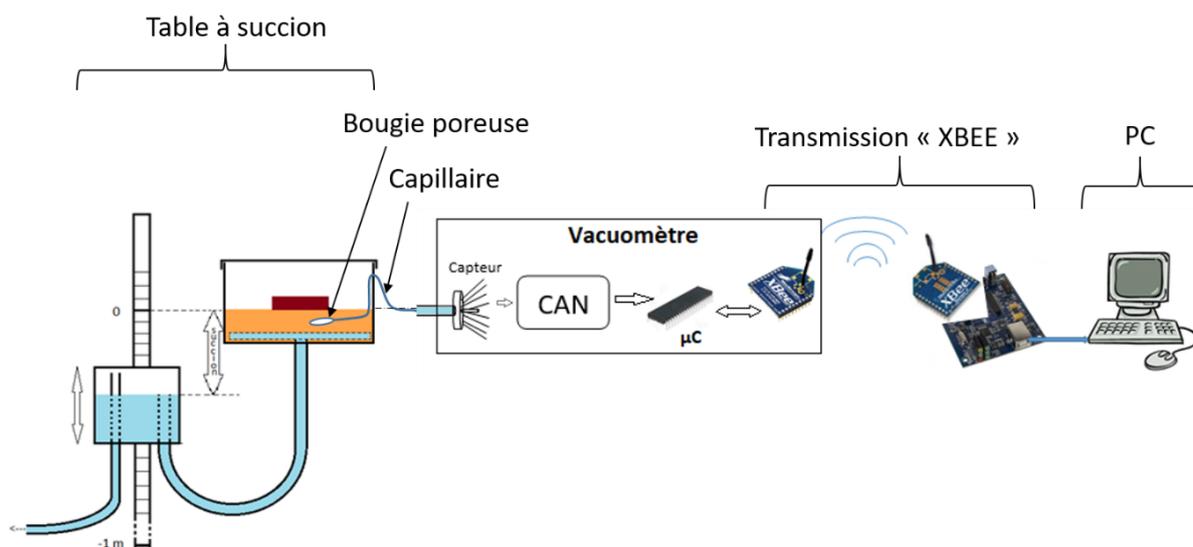


Figure 3 De la bougie au PC

Notre hauteur de référence sera celle de la surface de la silice, notre capteur sera donc aligné sur cette référence, la succion exercée sera transmise à la bougie poreuse.

La bougie poreuse et son capillaire

La transmission de la succion exercée dans la table à succion va se faire par l'intermédiaire d'une bougie en céramique poreuse et d'un capillaire (Figure 4) jusqu'au capteur de pression.

Dans un premier temps c'est une petite bougie de 2 mm de diamètre qui a été utilisée, la même que celle des boîtiers Wind du laboratoire, dispositif microtensiométrique développé au laboratoire et commercialisé par la société SDEC. Nous avons rencontré un problème juste après l'installation et les premiers essais, en augmentant la succion la bougie est remontée en surface. Le capillaire semi-rigide a exercé une force de rappel vers le haut

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2021 (103)

sur la bougie, le contact entre la bougie et la silice était insuffisant. Ce problème a rapidement été résolu, en utilisant une bougie de 6 mm de diamètre, la bougie reste bien en place dans la table à suction.



Figure 4 Bougie poreuse et son capillaire (Photo B. Thomas)

Le vacuomètre

Le module électronique conçu, appelé vacuomètre, va permettre de vérifier le bon fonctionnement et la continuité du circuit hydraulique de la table à suction.

Les fonctions assurées par le vacuomètre sont les suivants :

- mesurer la pression ;
- mesurer la température ;
- enregistrer les coefficients d'étalonnage ;
- envoyer les données vers un PC ;
- afficher la température interne du boîtier ;
- afficher la pression corrigée suite à l'étalonnage.

Six vacuomètres ont été fabriqués pour équiper les six tables à suction du laboratoire de mesures hydrodynamiques de l'UMR, chacun est constitué d'un capteur de pression analogique, suivi d'un CAN (convertisseur analogique/numérique) et d'un microcontrôleur (circuit intégré qui va réaliser comme un ordinateur une multitude de tâches). Celui utilisé dans le module vient de chez Microchip et a été programmé en langage MikroC de MikroElektronika.

Le module comprend aussi un écran LCD pour un affichage de la pression et de la température interne du boîtier. Le capteur de pression étant sensible à la température (sa réponse est fonction de la température), un capteur de température a été intégré dans le système pour permettre la correction qu'il est nécessaire d'apporter.

Les données sont traitées par le microcontrôleur et envoyées sur un PC, pour y être enregistrées, via les modules X-Bee qui permettent une communication sans fil comme le WIFI. Elle est utilisée dans l'industrie.

Le capteur de pression

Le capteur analogique model 33A-015D (Figure 5) de chez MEAS est déjà utilisé au laboratoire dans les boîtiers Wind depuis de nombreuses années, sa précision est de 0.1 %. La pression transmise par la bougie poreuse et le capillaire déforme la membrane du capteur. Cette déformation est mesurée par des jauges de contrainte. La déformation est ainsi transformée en tension (grandeur analogique) et par l'intermédiaire du convertisseur

analogique/numérique est transformée en grandeur numérique. Une grandeur numérique est codée en binaire (suite de 0 et de 1) compréhensible par les systèmes informatiques et donc utilisable par un microcontrôleur.

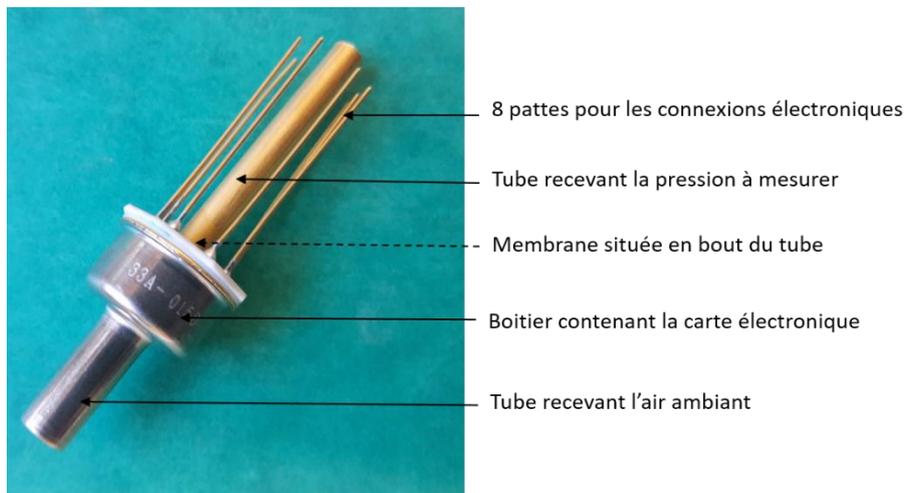


Figure 5 Capteur de pression 33A-015D (Photo B. Thomas)

Le boitier final

La carte électronique a été intégrée dans un petit boîtier de 12 cm x 9 cm x 6 cm (Figure 6 et Figure 7) qui est fixé sur la table à succion.

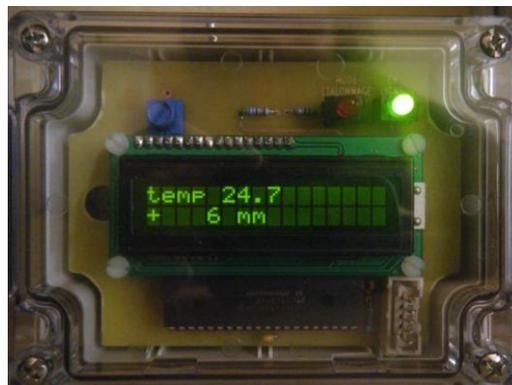


Figure 6 Le boîtier vacuomètre face avant (Photo B. Thomas)

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2021 (103)

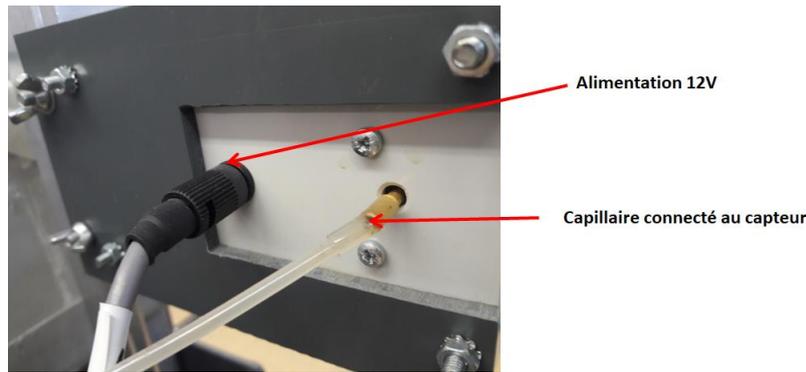


Figure 7 Le boîtier vacuomètre face arrière (Photo B. Thomas)

Le boîtier est alimenté en 12V continu.

Il a fallu également concevoir un boîtier spécifique pour l'alimentation en 12V continu des six vacuomètres.

La transmission

C'est le protocole de communication sans fil ZigBee qui est utilisé. Il est basé sur la norme 802.15.4.

Il est destiné aux réseaux sans fil de la famille des WPANs (Wireless Personal Area Networks : réseau à dimension personnelle). C'est un « Wifi industriel ».

Les modules d'émission et de réception s'appelle X-Bee, ils ont une portée de 100 m à 1500 m.

Cette longue portée est très utile pour commander les boîtiers lors des étalonnages. L'enceinte régulée en température utilisée pour faire les essais se trouve en effet dans un autre laboratoire.

Le PC

Un logiciel a été développé dans une première version en langage C++ puis dans une deuxième version en Labview. Ce logiciel est installé sur un PC afin de communiquer avec les six vacuomètres. Le système d'exploitation est Windows, un module X-Bee est connecté sur une entrée USB du PC pour recevoir les informations.

Le logiciel permet de :

- paramétrer le port de communication ;
- recevoir les données ;
- extraire les données de température et de pression ;
- afficher les données ;
- sauvegarder les données ;
- commander le boîtier, mise en marche, en arrêt ou en étalonnage ;
- envoyer les coefficients correcteurs calculés lors de l'étalonnage ;
- afficher l'historique des données ;
- envoyer des alertes de mauvais fonctionnement de la table.

L'Interface Homme Machine

L'espace de travail est divisé en quatre parties indépendantes qui sont sélectionnables par les onglets.

La première partie nommée « Principale » permet de vérifier l'état de fonctionnement du port série et des tables à succion (Figure 8).

La deuxième partie nommée « Visualisation » permet de récupérer les valeurs enregistrées dans les fichiers de sauvegarde des tables.

La troisième partie nommée « Etalonnage » permet d'envoyer les coefficients d'étalonnage aux modules et de visualiser le fichier de sauvegarde.

La quatrième partie nommée « Paramétrage » permet de sélectionner le port série, de choisir l'intervalle de temps entre deux mesures, de demander l'état d'une table et d'indiquer l'adresse mail d'envoi des alertes.

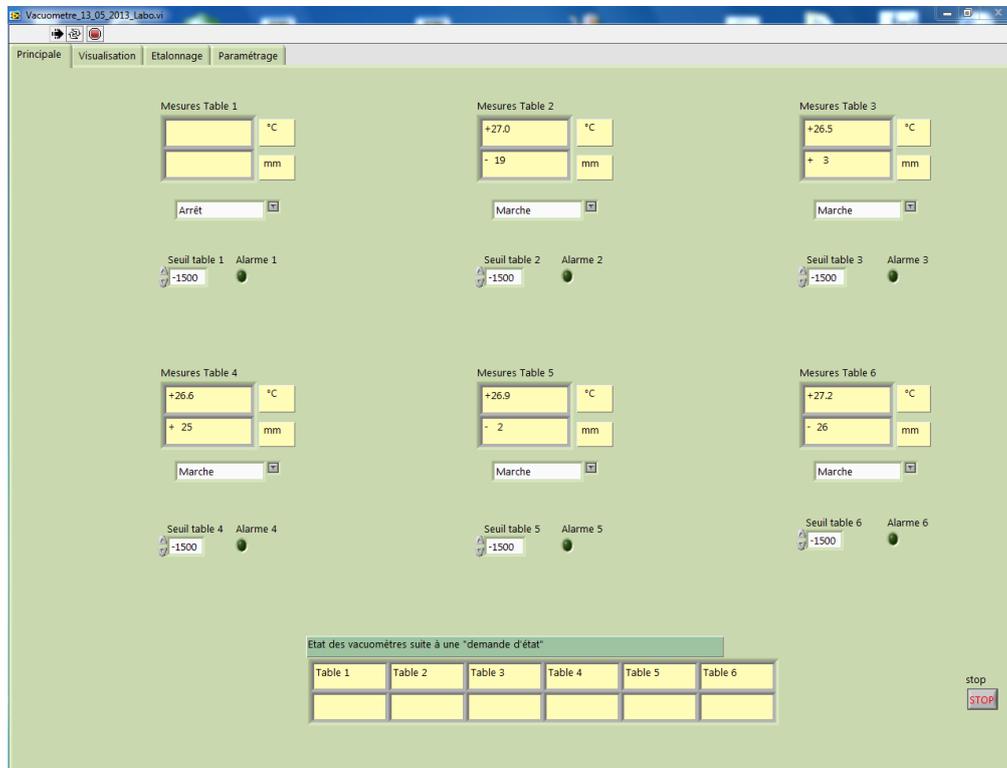


Figure 8 L'interface graphique page principale

Résultats

Mise en place

Tout d'abord, il faut dégazer l'eau qui est utilisée pour saturer correctement la bougie poreuse et son capillaire, ainsi que la partie du capteur recevant le capillaire.

La connexion entre le capteur et le capillaire est délicate puisqu'aucune bulle d'air ne doit entrer.

Ensuite la bougie est installée dans la silice en faisant très attention à ne pas la casser.

Une fois la bougie installée, nous mettons l'entrée du capteur à hauteur du niveau de la silice de la table à succion, pour mesurer la pression appliquée sur les échantillons qui seront posés sur la silice. Le boîtier peut coulisser sur un montant métallique fixé sur la table (Figure 9).



Figure 9 Table à succion avec son vacuomètre (Photo B.Thomas)

Les vacuomètres ont commencé à être installés sur les tables à succion fin 2012. Ils fonctionnent en continu et sont donc sollicités.

Les essais ont été longs à réaliser du fait de l'attente de la stabilisation entre deux pressions et de la disponibilité des tables à succion.

Étalonnage des vacuomètres

Les appareils électroniques mesurant des grandeurs physiques nécessitent des étalonnages. Les composants peuvent avoir une dérive avec la température, ce qui est le cas de notre capteur. Lors des tests du capteur de pression, des mesures ont été effectuées dans une enceinte régulée en température. Avec le générateur de pression nous avons exercé différentes pressions de + 200 mmH₂O à -1500 mmH₂O par pas de 100 mmH₂O pour différentes températures de +15°C à + 35°C par pas de 2.5°C

Pour chaque température la réponse du capteur en fonction de la pression exercée a permis d'obtenir une courbe de type linéaire $aX+b$ (Figure 10).

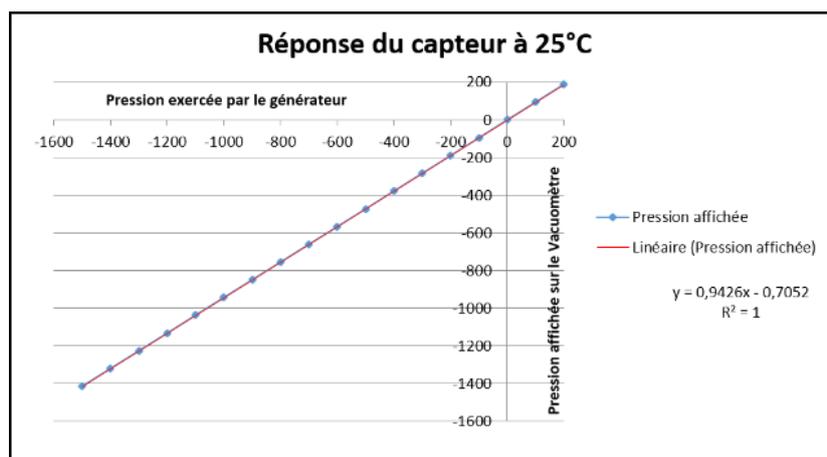


Figure 10 Réponse du capteur à 25°C

Ensuite deux courbes en fonction de la température ont pu être tracées, celle des coefficients directeurs (a) est une fonction linéaire de type $aX+b$ et celle des offsets (b) fonction polynomiale de degré 2 cX^2+dX+e (Figure 11).

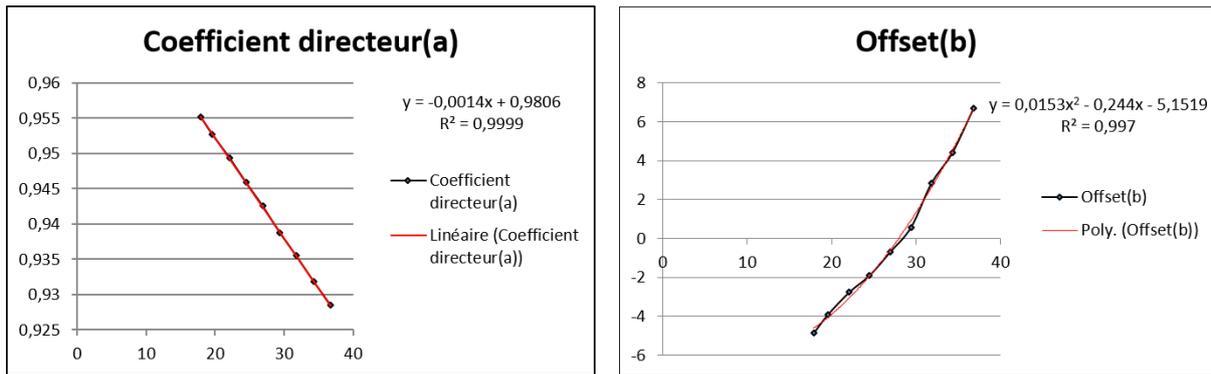


Figure 11 Réponse du capteur en fonction de la température

Ces deux fonctions ont pu facilement être intégrées dans le programme du microcontrôleur pour apporter la correction nécessaire afin que la valeur lue sur le vacuomètre corresponde à la valeur appliquée par l'étalon de pression.

L'étalonnage va donc consister à obtenir les deux courbes (linéaire et polynomiale) nécessaire à l'obtention de nos coefficients de correction de la température (a, b, c, d et e).

Ceux-ci sont envoyés par l'intermédiaire de l'IHM du PC au microcontrôleur du boîtier.

La Figure 12 montre qu'avant l'étalonnage il y a un écart avec la courbe théorique $y=x$ (courbe bleu clair plus longue) qui augmente avec la pression mais aussi avec la température et qu'après l'étalonnage les courbes se superposent sur la courbe théorique.

Dans cet exemple avant étalonnage la moyenne des écarts types entre la pression affichée sur le vacuomètre à différentes températures et la pression appliquée est de 28 mmH₂O, celle après étalonnage est de 5 mmH₂O.

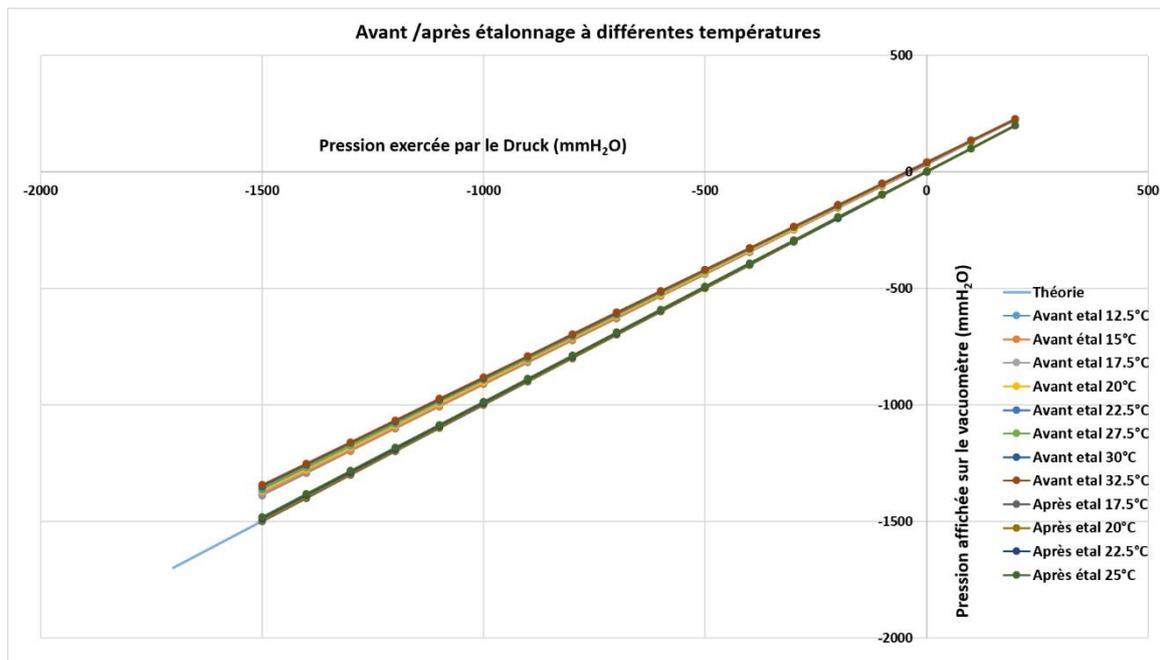


Figure 12 Avant/après étalonnage à plusieurs températures

Réalisation d'une interface air/eau

Les vacuomètres ont été étalonnés avant leur installation sur les tables à suction, l'embout du capteur vide d'eau. Les premiers essais de mise en fonctionnement des vacuomètres ont montré l'existence d'un comportement différent entre un fluide air et un fluide eau, il existe un biais de plusieurs centimètres, dans notre exemple 30 mmH₂O (Figure 13).

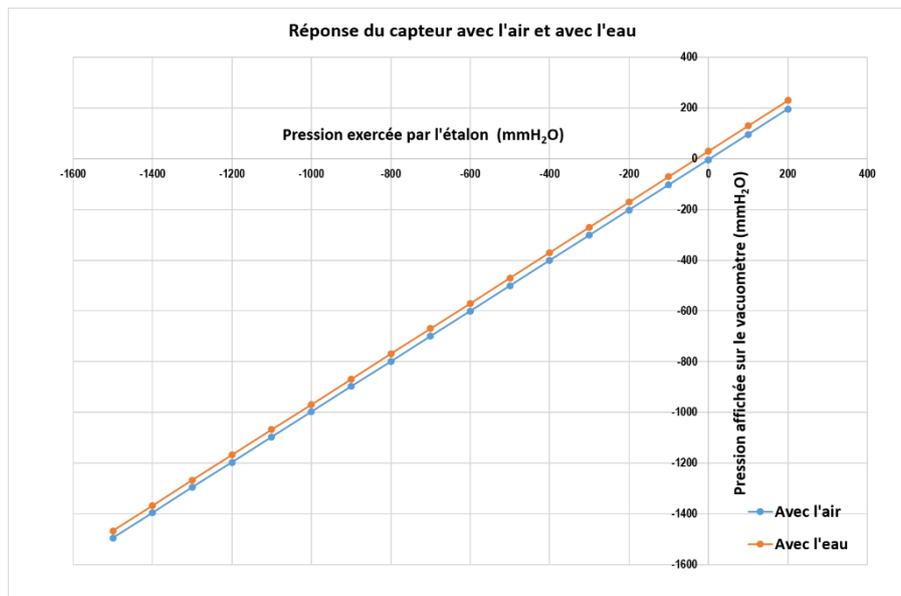


Figure 13 Réponse du capteur avec l'air et avec l'eau

Comme le générateur de pression étalon, Druck DPI 602, ne supporte pas la présence d'eau sous peine d'altération définitive il a fallu réaliser une interface air/eau (Figure 14) pour la transmission de la pression afin d'étalonner le vacuomètre dans des conditions d'utilisation.

Elle comporte une fiole à vide contenant du Silica gel pour que l'humidité ne remonte pas vers le générateur et une fiole à vide avec de l'eau mise au niveau du capteur.

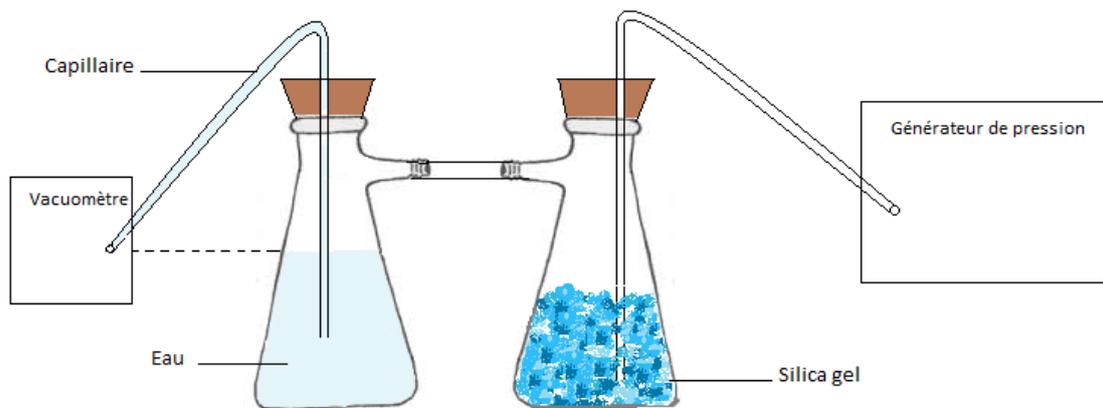


Figure 14 Interface Air/Eau

Aucune bulle ne doit rester dans le capillaire rempli d'eau relié au capteur. Des essais ont montré qu'une bulle d'air apporte un biais de quelques millimètres et ce biais augmente avec la pression (Figure 15).

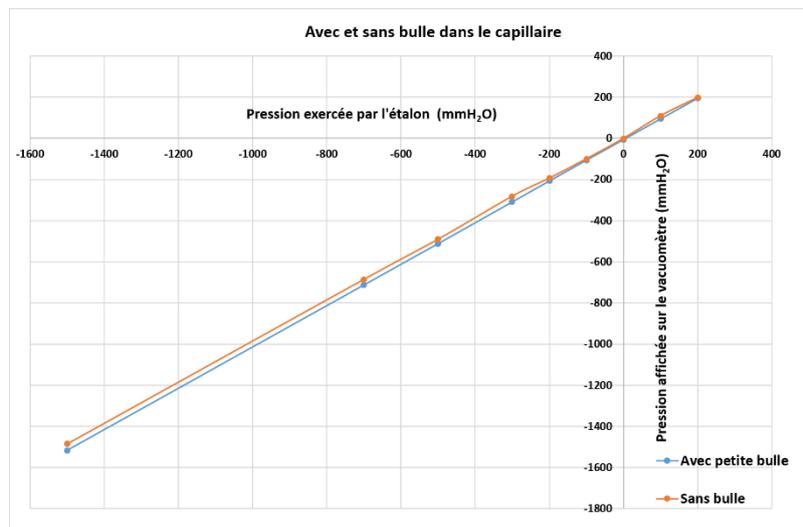


Figure 15 Avec et sans bulle dans le capillaire

Simplification de l'étalonnage

Les tables à succion étant situées dans un laboratoire climatisé nous réalisons l'étalonnage à une seule température, celle du laboratoire 22.5°C. Des tests nous ont donné les mêmes résultats qu'avec l'étalonnage à plusieurs températures de 15°C à 30°C (Figure 16).

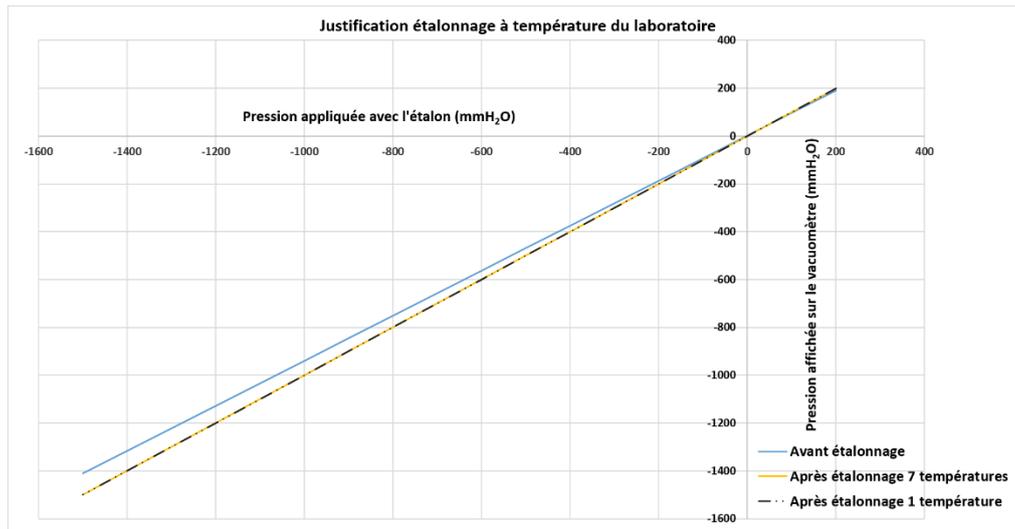


Figure 16 Justification étalonnage à température de laboratoire

Contrôle des tables à suction

Incertitudes autour du zéro

Une fois installé sur la table à suction, le vacuomètre ne donnait pas le zéro affiché sur le régle, malgré le soin apporté à l'étalonnage et à l'installation.

Plusieurs raisons peuvent être envisagées pour expliquer cela :

- la résolution du générateur de pression est de 1 mmH₂O (0,1 mbar) ;

Quand le générateur affiche 0 mmH₂O la pression générée est comprise entre -0.99 mmH₂O et +0.99 mmH₂O.

L'erreur apportée dans les très faibles pressions est donc très grande en valeur relative (presque +/- 100 % pour 0 mmH₂O), alors qu'elle n'est plus que de + ou - 0,11 % pour 1000 mmH₂O.

A cela s'ajoutent les erreurs de parallaxe lors de la mise en place du vacuomètre sur la table à suction pour mettre au même niveau le capteur avec le niveau de la silice à l'intérieur de la table à suction :

- report du niveau de la silice sur l'extérieur de la table ;
- mise du capteur au niveau de la silice ;
- report du niveau de la silice sur le régle ;
- lecture du régle ;
- niveau d'eau dans le réservoir.

Par contre les mesures en relatif donnent de très bons résultats. Seule la lecture sur le régle peut engendrer une erreur.

Une pression de 1 mmH₂O sera détectée par le capteur et il affichera cette différence (Figure 17)

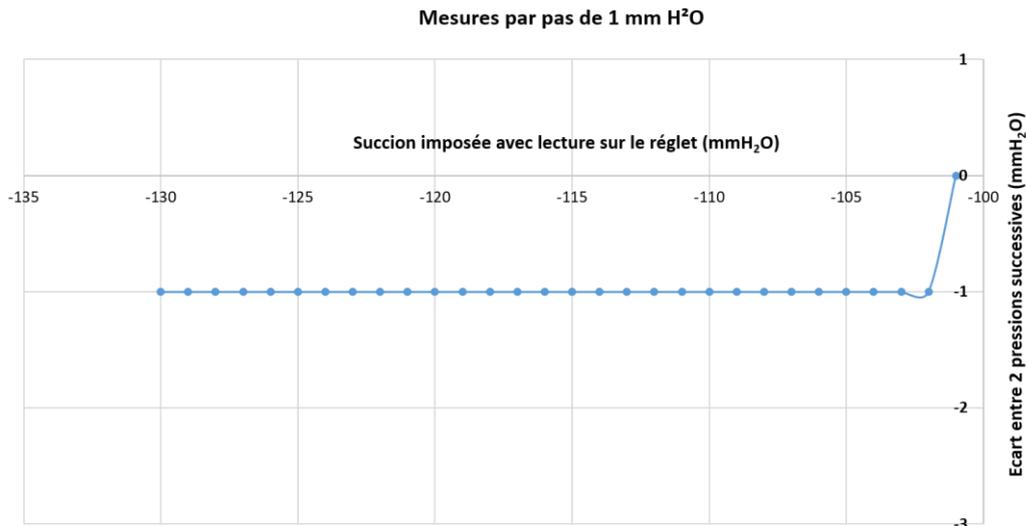


Figure 17 Mesures par pas de 1 mmH₂O

Stabilisation des mesures

La pression à l'intérieur de la table a besoin de se stabiliser après que l'on ait changé la valeur de la suction imposée. La Figure 18 nous montre qu'il est nécessaire d'attendre la stabilisation après chaque réglage de la suction. Cette figure permet de visualiser les données enregistrées par le vacuomètre pour différentes succions imposées juste après avoir perturbé de 10 mmH₂O la suction imposée (courbe orange) ou 30 minutes après la perturbation (courbe verte). Après 30 min de stabilisation, la perturbation mesurée par le vacuomètre est proche de la perturbation apportée, alors qu'elle est très différente lorsque les mesures sont réalisées juste après avoir apporté cette perturbation. Lors de la vérification des tables à suction l'expérience montre que le temps de réponse du système est de l'ordre de 30 minutes.

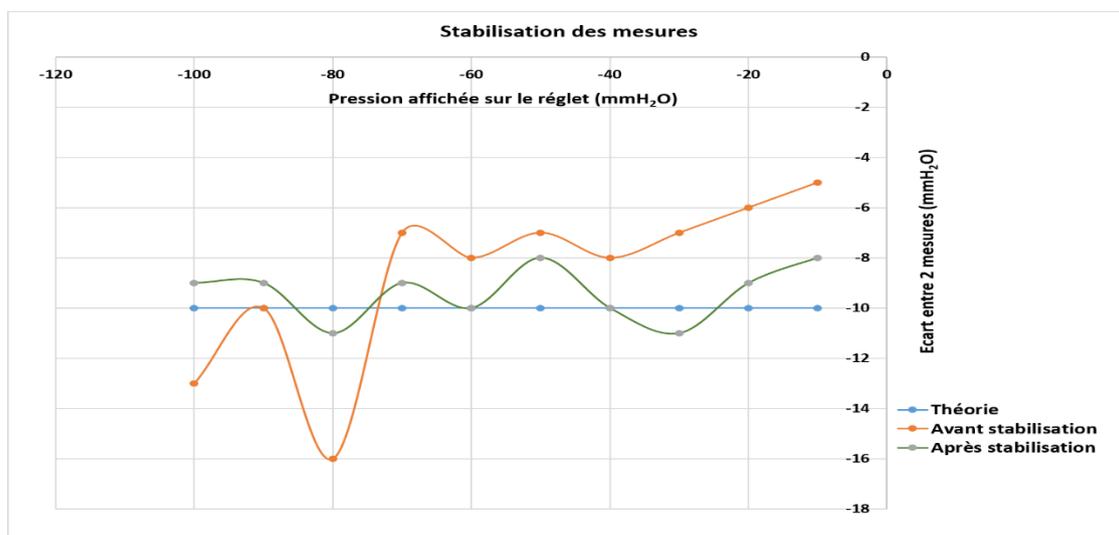


Figure 18 Stabilisation des mesures

Détection d'un dysfonctionnement de la table à succion

Une fois l'étalonnage réalisé et le boîtier connecté à la table, il faut contrôler le bon fonctionnement de la table à succion. Pour cela il suffit de créer une succion par pas de 100 mmH₂O en descendant le réservoir le long du réglage gradué et de noter la pression affichée sur le vacuomètre.

Sur le graphique de la Figure 19, nous pouvons voir que le vacuomètre affichait -250 mmH₂O pour une succion appliquée de -500 mmH₂O (courbe orange) et sur le graphique de la Figure 20 une différence de pression entre deux succions successives de 50 mmH₂O au lieu des 100 mmH₂O attendue (courbe orange).

La table à succion est donc défaillante et des bulles sont certainement piégées dans le système.

Il a fallu trouver et mettre en œuvre une technique simple relativement rapide et surtout efficace pour ôter les bulles d'air prisonnières dans la table et responsables d'erreurs sur la succion appliquée aux échantillons.

Après avoir ôté les bulles de la table nous obtenons bien une courbe de la pression affichée sur le vacuomètre (courbe bleue de la Figure 19) corrélée à la succion exercée affichée sur le réglage de la table (courbe grise) et entre deux mesures successives nous obtenons une différence de 100 mmH₂O (courbe bleue de la Figure 20).

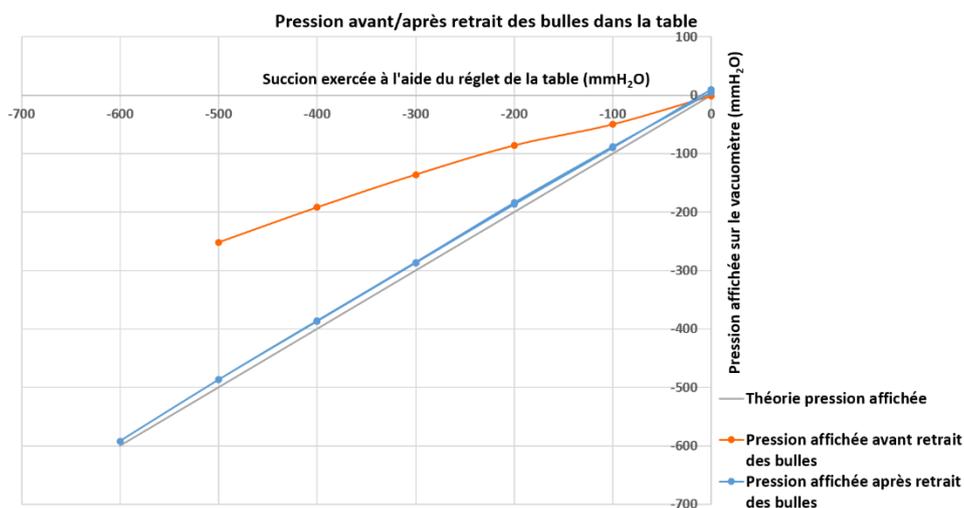


Figure 19 Pression avant/après retrait des bulles dans la table

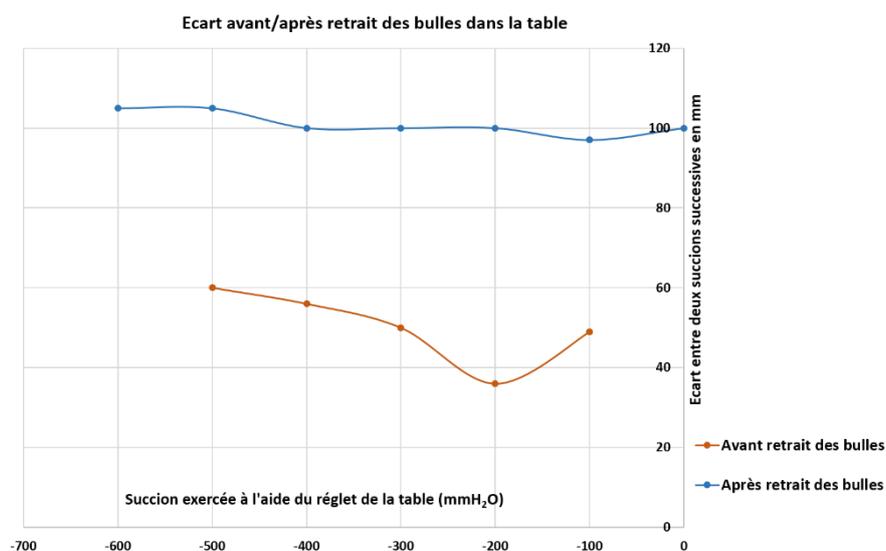


Figure 20 Ecart avant/après retrait des bulles dans la table

Retour d'expérience

Dérive sur 2 ans

La dérive la première année (Figure 21 courbe orange 2019_dérive 1 an) est faible, en moyenne 15 mmH₂O mais devient plus grande (autour de 50 mmH₂O) la deuxième année (Figure 21 courbe verte 2020_dérive 2 ans).

Par contre en relatif par pas de 100 mmH₂O on constate qu'il n'y a guère de dérive, moins de 3 mmH₂O (Figure 22). Les causes probables de ces dérives peuvent être, une dérive normale au court du temps de la réponse du capteur de pression, une déformation de la membrane du capteur, une formation de bulles d'air dans l'embout du capteur.

Nous conseillons donc de réaliser un étalonnage au minimum toutes les années pour garantir la précision et la justesse des mesures réalisées.

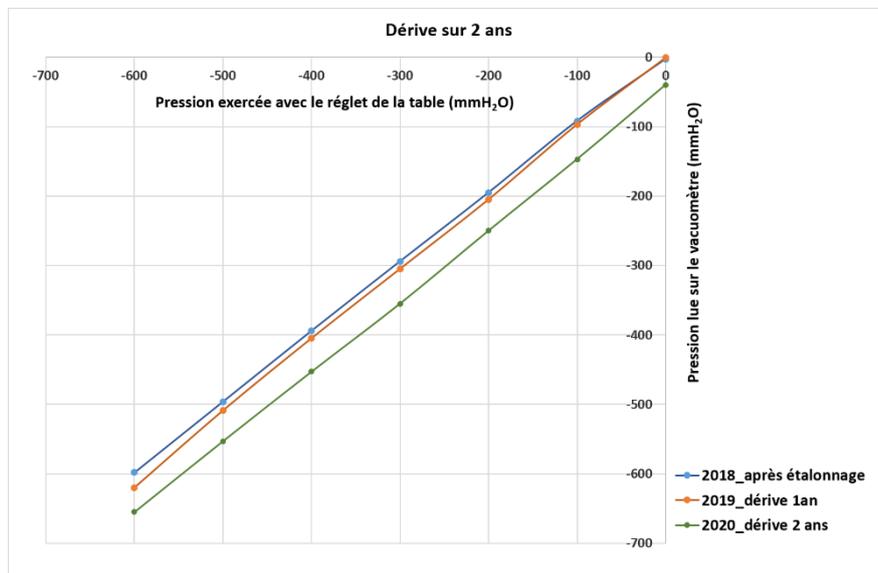


Figure 21 Dérive sur 2 ans de la mesure de pression

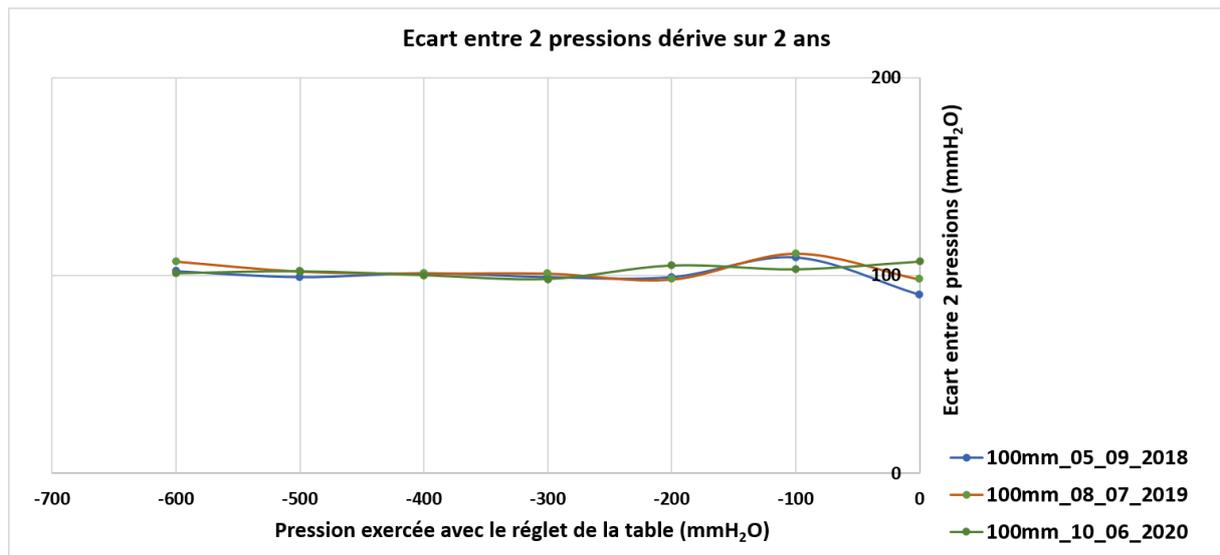


Figure 22 Dérive sur 2 ans de l'écart entre deux pressions

Usure des capteurs

Le capteur du vacuomètre est constamment en contact avec de l'eau ce qui entraîne une usure prématurée. La durée de vie de ces capteurs dans ces conditions environnementales est d'environ six ans.

Bougies poreuses dans différents liquides

Lors d'une manipulation, un étudiant a ajouté du CaCl₂ sur une table à succion modifiant la valeur affichée sur le vacuomètre.

Une étude plus approfondie sur les bougies poreuses que nous utilisons a été faite pour tenter d'expliquer pourquoi l'ajout de CaCl₂ a pu modifier la valeur de la succion enregistrée par le capteur de pression du vacuomètre. Plusieurs tests ont été réalisés pour étudier le comportement des bougies poreuses sur la transmission de la pression avec différents liquides, différentes concentrations de silice, différentes positions de la bougie dans le contenant, différents contenants.

Les seules erreurs significatives ont été apportées par les différents liquides. La masse volumique a été calculée pour chaque liquide utilisé. Les résultats ont montré que la mesure est dépendante de la masse volumique du liquide, le système de mesure (Capteur/bougie) peut apporter une erreur de 1 cm pour 10 cm de niveau de liquide en fonction de la masse volumique (Figure 23).

Ces manipulations ont permis de confirmer que l'utilisation de silice dans la table à succion n'apporte pas de perturbation sur la transmission de la pression.

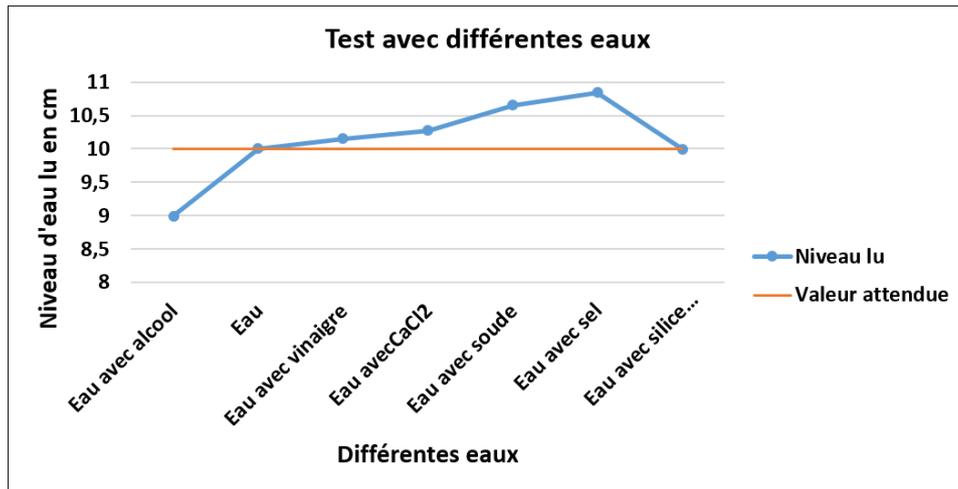


Figure 23 Test avec différentes eaux

Conclusion

Les problèmes rencontrés montrent que le vacuomètre fixé sur une table à succion ne peut pas nous donner une valeur absolue au mm près lorsque la succion imposée est proche de 0.

Mais il permet bien de vérifier que notre table à succion est en état de fonctionnement et que son circuit hydraulique ne contient pas de bulle, ce qui était l'objectif initial. Il a été utilisé avec succès et permet de détecter une table défectueuse. C'est un élément important pour la fiabilisation des mesures réalisées sur les tables à succion dans une gamme de succion comprise entre la saturation (succion = 0 mmH₂O) et une succion maximale de 1000 mmH₂O.

Ce dispositif de mesure nécessite un étalonnage initial avant la première installation et des réétalonnages réguliers. Nous conseillons une fréquence annuelle pour les étalonnages qui doivent être réalisés non pas dans l'air comme cela se fait classiquement pour des capteurs de pression/dépression mais dans l'eau, ce qui a nécessité de construire un banc d'étalonnage spécifique.

Pour l'instant le dispositif vacuomètre-table à succion permet de s'assurer que la succion imposée par l'opérateur est bien transmise aux échantillons de sol. Une fiabilisation complète de la mesure nécessiterait de s'assurer que la succion est bien transmise au sein de l'échantillon de sol, l'interface entre le lit de silice et l'échantillon de sol pouvant entraîner une rupture hydraulique et donc une discontinuité de la succion. Ceci nécessiterait d'équiper l'échantillon de sol de son propre capteur de pression/dépression, la mesure en continue de la succion au sein de l'échantillon de sol permettrait de s'assurer d'une part de la bonne transmission de la succion imposée et d'autre part du temps d'équilibre nécessaire. Actuellement ce temps d'équilibre est défini sur la base de notre expertise (une à deux semaines selon la taille de l'échantillon) et en pesant chaque jour l'échantillon de sol, ce qui multiplie les risques de mauvaises manipulations et de rupture hydraulique entre le lit de silice et l'échantillon à chaque manipulation.

Recommandations

Il faut être très attentif à avoir de l'eau parfaitement dégazée et à n'avoir aucune bulle d'air dans le circuit d'eau, embout du capteur et capillaire que ce soit lors de l'étalonnage ou lors de la mise en place sur la table.

La table doit être vérifiée et pour qu'elle garde un bon fonctionnement il est nécessaire de saturer la table à succion à la fin des tests.

Perspectives

Le vacuomètre pourrait être utilisable pour d'autres besoins de mesure de pression car une fois étalonné il mesure une pression au mmH₂O (0.1 mbar) près.

Il peut être envisagé de rechercher ou concevoir un système de report du niveau de la silice jusqu'au capteur de pression qui permettrait d'obtenir un zéro avec une précision plus proche du millimètre qu'actuellement.

Enfin l'expérience acquise lors du développement de ce dispositif a été mise à profit pour concevoir un infiltromètre de terrain simple anneau automatisé, il permet de maintenir un niveau d'eau constant au fond d'un anneau et d'enregistrer le flux d'infiltration tout au long de l'expérimentation.

Pour en savoir plus

Une documentation du vacuomètre est disponible au laboratoire :

- Manuel utilisateur ;
- Procédure d'étalonnage ;
- Manuel du projet ;

- Notice pour enlever les bulles d'air d'une table qui comble un manque dans la documentation du constructeur.

Références de quelques matériels utilisés

- Céramique poreuse (bougie poreuse) diamètre 6 mm code sdec 230 chez SDEC France ;
- Capillaire nylon STM 21309 chez SDEC France ;
- Capteur analogique de pression Model 33A-015D chez MEAS – France ;
- Convertisseur analogique/numérique CAN MCP3421 chez RS-Components ;
- Capteur numérique de température MCP9800/3 chez RS-Components ;
- μ C Microcontrôleur Pic18F4520 de Microchip chez RS-Components ;
- Langage de programmation utilisé pour le microcontrôleur : C (MikroC de MikroElektronika) ;
- Langage de programmation utilisé pour l'IHM : C++ avec QT ;
- Langage de programmation graphique pour l'IHM_V2 avec Labview.

Remerciements

Je remercie les personnes qui m'ont encadré, Franck Tison pour la conception électronique et Nathalie Moitrier pour la conception logicielle, ainsi que Stéphane Ruy pour la relecture de cet article et les corrections apportées.

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 « Le Cahier des Techniques de l'Inra », la date de sa publication et son URL).

Bibliographie

Table à succion M1-0801e pour déterminer le pF, société Eijkelkamp

Norme ISO 11274 : 2019(fr) Qualité du sol -Détermination de la caractéristique de la rétention en eau- Méthodes de laboratoire

Méthode de Wind. Notice technique. Version 1 Gaudu JC, Bourlet M, Mohrath D, Chanzy A, Bertuzzi P (1996).

Fiche de protocole, Étalon de pression d'air (Druck)

Fiche de données de sécurité de la Silice broyée, société Sibelco France

Silice cristalline Fiche toxicologique n°232 INRS