



HAL
open science

Automatisation d'un infiltromètre à succion et quantification détaillée de la précision de la chaîne d'étalonnage

Bernard Bruneau

► **To cite this version:**

Bernard Bruneau. Automatisation d'un infiltromètre à succion et quantification détaillée de la précision de la chaîne d'étalonnage. Sciences du Vivant [q-bio]. 2000. hal-02840141

HAL Id: hal-02840141

<https://hal.inrae.fr/hal-02840141>

Submitted on 7 Jun 2020

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

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



IUT Mesures Physiques
GRENOBLE



Institut National de la Recherche
Agronomique
Unité de Science du Sol
AVIGNON

AUTOMATISATION D'UN INFILTROMETRE A SUCCION ET QUANTIFICATION DETAILLEE DE LA PRECISION DE LA CHAINE D'ETALONNAGE



BRUNEAU Benjamin
Groupe T1

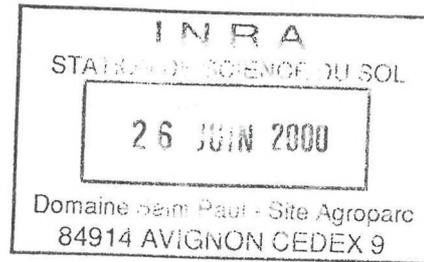
1999-2000



IUT Mesures Physiques
GRENOBLE



Institut National de la Recherche
Agronomique
Unité de Science du Sol
AVIGNON



AUTOMATISATION D'UN INFILTROMETRE A SUCCION ET QUANTIFICATION DETAILLEE DE LA PRECISION DE LA CHAINE D'ETALONNAGE



BRUNEAU Benjamin
Groupe T1

1999-2000

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION	1
<u>I - Théories</u>	2
I-1 : Principe de mesure	2
I-1-a : Propriétés hydrodynamiques d'un sol	2
I-1-b : Présentation de l'infiltromètre	2
I-1-c : Mesures et traitement	3
I-1-d : Avantages et inconvénients	5
I-2 : Principe de l'acquisition automatique	5
I-2-a : Pourquoi ?	5
I-2-b : Comment ?	5
I-3 : Les erreurs de mesures	6
I-3-a : Définition	6
I-3-b : Détermination de l'erreur	7
<u>II - Matériels et méthodes</u>	8
II-1 : Conception	8
II-1-a : Les capteurs	8
II-1-b : La chaîne de mesure	9
II-1-c : Aspect de l'ensemble	13
II-2 : Les différentes sources d'erreurs possibles	13
II-3 : L'étalonnage	14
II-3-a : Choix de la stratégie d'étalonnage	14
II-3-b : Mise en œuvre	14
<u>III - Résultats et discussions</u>	16
III-1 : L'étalonnage	16
III-2 : Comparaison relevé manuel/ relevé automatique	17
III-3 : Conséquences sur le traitement des données	20
CONCLUSION	22
BIBLIOGRAPHIE	23
ANNEXE	24

INTRODUCTION

L'équipe qui m'a accueilli à l'unité de Science du Sol de l'INRA d'Avignon étudie les transferts d'énergies et de masses dans le sol, et l'influence du sol (composition, structure) sur ces transferts. L'élément qui se transfère le plus souvent dans le sol et qui est primordial pour la survie de toutes formes de vie végétale et animale, est l'eau. Ces transferts peuvent être caractérisés par les propriétés hydrodynamiques du sol. La connaissance de celles-ci ne sert pas uniquement au niveau agronomique, mais aussi au niveau environnemental et la meilleure façon d'exploiter un sol va forcément dépendre de ces propriétés. En effet, si la perméabilité hydraulique d'un sol, qui dépend de son pouvoir de saturation et de sa capacité à stocker l'eau, est trop élevée, l'eau pénétrera trop rapidement dans le sol et pourra entraîner, lors de sa descente, des matières polluantes, comme les nitrates par exemple, jusqu'aux nappes phréatiques ou aux rivières souterraines. A contrario, pour un sol n'absorbant pas suffisamment l'eau de pluie, il pourrait y avoir des phénomènes de ruissellement avec transport de matières solides donc érosion accélérée et à plus grande échelle entraîner la crue de rivières ou de fleuves.

L'un des appareils disponibles pour la détermination des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol est l'infiltromètre à succion, plus communément appelé TRIMS. Cependant la prise de mesure avec cet appareil est répétitive et se fait uniquement à la main. D'où la nécessité d'automatiser la mesure afin de récupérer les données sur un ordinateur, tout en essayant de limiter les erreurs pouvant être entraînées par le capteur et la chaîne de mesure. Le travail consistait donc à concevoir, réaliser et étalonner la chaîne de mesure, et par la suite comparer les résultats qu'elle renvoie par rapport à ceux obtenus en suivant l'ancienne méthode de mesure.

Dans le rapport qui suit, vous trouverez une première partie présentant les aspects théoriques du stage, avec le principe de la mesure d'infiltration avec le TRIMS, celui de l'acquisition automatique et une présentation théorique des erreurs sur la mesure et leurs sources.

Ensuite, la deuxième partie sur le matériel et les méthodes employées présentera la conception proprement dite, les principales sources d'erreurs entraînées par le montage et par les conditions dans lesquelles sont prises les mesures, et enfin la stratégie d'étalonnage adoptée pour essayer de limiter ces erreurs.

Enfin, dans la troisième partie intitulée Résultats, on trouve justement les résultats concernant l'étalonnage de la chaîne de mesure avec les incertitudes sur la mesure. On verra ensuite la comparaison des mesures manuelles avec les mesures automatiques et la conséquence sur leur traitement et sur le résultat final.

I : Théories.

I-1 : Principe de la mesure.

I-1-a : Propriétés hydrodynamiques d'un sol.

Le sol est un milieu dans lequel on rencontre trois phases : des particules solides (sables, argiles) délimitant des pores qui peuvent être remplis d'air ou d'eau. La teneur en eau, notée θ , d'un échantillon de sol (volume d'eau / volume d'échantillon), varie donc entre la teneur en eau à saturation (tous les pores sont remplis d'eau) et une valeur très faible dite teneur en eau résiduelle. Lorsque le sol n'est pas saturé, l'eau présente dans le sol forme des ménisques entre les grains de solides : elle se trouve donc en dépression par rapport à la pression atmosphérique, sous l'effet des phénomènes de tension superficielle. On note h son état énergétique et on l'exprime en hauteur d'eau par rapport à la pression atmosphérique. h est donc négatif lorsque le sol n'est pas saturé, il est égal à 0 lorsque le sol est juste saturé et devient positif au sein des nappes d'eau souterraines. La relation $h(\theta)$ dite courbe caractéristique est une des propriétés hydrodynamiques du sol.

Le sol est un milieu qui conduit l'eau. La loi de Darcy généralisée exprime la relation entre le flux surfacique d'eau et un gradient moteur appelé gradient de charge hydraulique :

$$\bar{q} = -K(h)\bar{\nabla}(h - z) \quad \text{avec } H = h - z = \text{charge totale,}$$

h = potentiel de l'eau dans le sol,
 z = profondeur par rapport à la surface du sol.

Le coefficient de proportionnalité $K(h)$ est appelé conductivité hydraulique et dépend du sol bien-sûr et de θ : il traduit la capacité du sol à conduire l'eau.

La 3^{ème} propriété hydrodynamique d'un sol est la sorptivité capillaire $S(\theta_i, \theta_0)$: elle traduit la capacité du sol à stocker l'eau par capillarité entre un état initial θ_i , et un état final θ_0 .

L'appareil utilisé permet de déterminer $K(h)$ et $S(h)$ proche de la saturation (pour $-20\text{cmCE} < h < 0$).

I-1-b : Présentation de l'infiltromètre.

Nous avons utilisé un infiltromètre à succion appelé TRIMS, pour «Triple Rings Infiltrometer at Multiple Suction». Il permet de calculer ces coefficients pour un sol proche de la saturation (voir **figure 1**).

Il apporte de l'eau à la surface du sol à un potentiel élevé, proche de 0 ($-20 < h < 0$) et permet de suivre la cinétique d'infiltration du sol.

Le TRIMS est formé de quatre parties :

- un réservoir gradué, pour l'alimentation en eau, fermé en son sommet par un bouchon en caoutchouc qui est traversé par un tube capillaire pour permettre de l'alimenter en eau. Ce tube est fermé lors de la mesure pour isoler hermétiquement le réservoir de l'extérieur,
- un autre réservoir gradué, de dépressurisation (ou vase de Mariotte), fermé, dans lequel coulisse un tube pour permettre le réglage de la succion (jusqu'à 20cmCE).

On y trouve un second tube permettant une communication entre les deux réservoirs,

- une embase circulaire munie d'une grille métallique sur laquelle est tendue une membrane en Nylon tissé (diamètre des pores $20\mu\text{m}$; pression d'entrée d'air 70 cmCE) qui permet lorsqu'elle est saturée la transmission de la pression de l'eau au sol, mais empêche aussi l'air de remonter par l'embase dans le réservoir,
- enfin un support sur lequel se fixent le vase de Mariotte, un des trois réservoirs d'alimentation ($\varnothing_{\text{intérieur}} = 13.76$ ou 33.81 ou 50.36 mm) et l'une des quatre embases ($\varnothing_{\text{intérieur}} = 48.17$ ou 80.90 ou 190.05 ou 250.08 mm).

La spécificité de la mesure avec cet appareil est que l'eau infiltrée dans le sol n'est pas en pleine charge, mais plutôt à un potentiel hydraulique h_0 assez faible, connu et réglable. En effet, la succion appliquée dépend directement de la dépression dans le vase de Mariotte qui peut aller jusqu'à 20cmCE environ et elle peut se communiquer au sol par l'intermédiaire de l'embase. Ceci permet d'avoir lors de l'infiltration un sol que l'on dit non saturé en eau, avec un potentiel $h_0 = e + h_2 - h_1$ (e = épaisseur de la couche de sable ; h_2 = hauteur entre toile Nylon et bas du tube en L ; h_1 = longueur du tube de réglage de succion immergée), en supposant une répartition hydrostatique de la pression dans les 2 réservoirs et dans la couche de sable (voir **figure 1** pour les notations).

I-1-c : Mesures et traitement :

La mesure d'infiltration avec le TRIMS est assez délicate à mettre en œuvre. Des études ont été faites (ZAREMBA, 1996) afin d'élaborer un protocole de mise en œuvre. Celui-ci explique en détail, étape par étape, comment assembler l'appareil et préparer le sol pour la mesure (cf. **annexe 1**).

Pour avoir des résultats acceptables, les grandes lignes du protocole sont :

- aucune entrée d'air autre que par le tube de réglage de la succion (ajout de graisse silicone sur toutes les jonctions du TRIMS),
- aucune bulle d'air sous la membrane (perturbe l'écoulement),
- un bon contact entre sol et appareil (couche de sable S33, boucher les fissures en surface du sol).

Une fois le sol et l'appareil prêts pour l'expérience, la mesure "manuelle" peut commencer. Elle consiste à relever les hauteurs d'eau à intervalles de temps réguliers ou à relever les temps de passage du niveau devant les graduations du réservoir, afin d'avoir une relation entre la quantité d'eau infiltrée et le temps, la référence temporelle étant l'instant où l'infiltromètre a été posé sur le sol.

Avec toutes ces données, on peut déterminer le flux cumulé d'infiltration (noté I dans la suite du rapport et exprimé en mm), en fonction du temps. Cette variable est le point de départ commun à toutes les méthodes de résolution élaborées jusqu'à présent pour déterminer les paramètres hydrodynamiques : la conductivité hydraulique et la sorptivité capillaire.

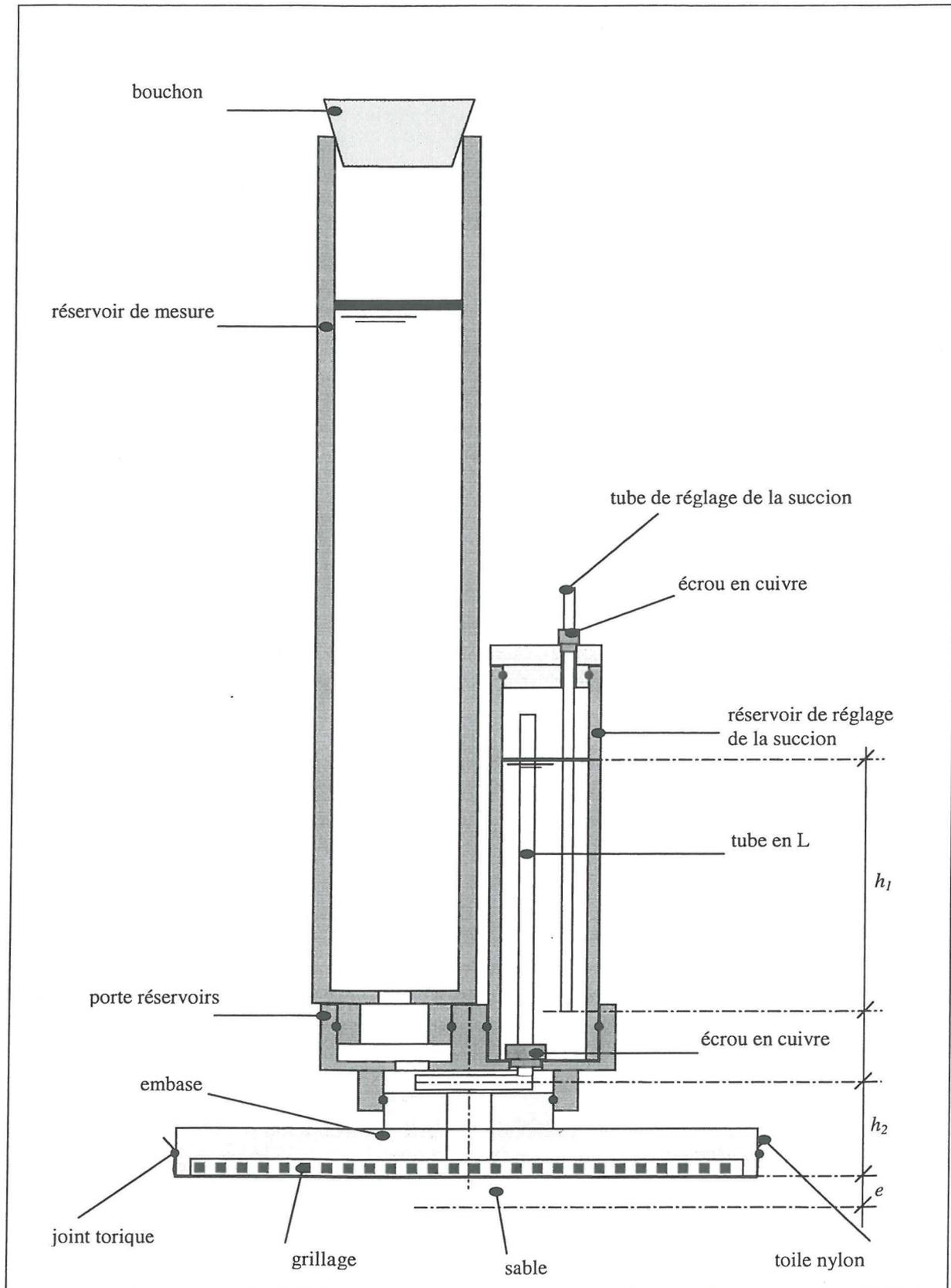


figure 1 : schéma détaillé du TRIMS

I-1-d : Avantages et inconvénients :

Les paramètres que l'on peut déterminer grâce à cet infiltromètre sont très importants lors de l'étude d'un sol. De plus, le temps mis par cet appareil pour effectuer un essai complet d'infiltration n'est que de quelques heures alors que d'autres dispositifs d'infiltration verticale mettent plusieurs jours pour atteindre le même résultat (RAMANDA, 1995).

Cependant, la mesure demande à être préparée avec soin et nécessite la présence de deux personnes pendant toute la durée de l'expérimentation.

Le fait qu'une personne dicte à l'autre les hauteurs d'eau et que ces hauteurs soient ensuite entrées dans un ordinateur peut être susceptible d'introduire des erreurs sur le résultat final.

Enfin le manipulateur se trouve dans un certain inconfort lors de la prise de mesures sur le terrain, puisqu'il doit être au niveau du ménisque dans le réservoir, ce qui l'oblige à s'allonger sur le sol qui n'est pas forcément un vert pâturage.

Voilà pourquoi il a été décidé à l'INRA d'Avignon d'automatiser cet infiltromètre.

I-2 : Principe de l'acquisition automatique.

I-2-a : Pourquoi ?

Cette automatisation n'aura pas pour conséquence de rendre la préparation de la mesure plus simple ou plus rapide. Par contre, elle aura les avantages suivants :

- de ne nécessiter la présence que d'un seul manipulateur,
- de récupérer les données sur un ordinateur par l'intermédiaire d'une centrale d'acquisition, ce qui élimine les erreurs de lecture et de retranscription,
- de pouvoir effectuer plusieurs mesures d'infiltration simultanée et donc dans les mêmes conditions climatiques, ce qui facilite l'estimation de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques à l'échelle d'une parcelle.

Il se trouve en plus que des automatisations, utilisant des capteurs de pression, sur des modèles à peu près similaires d'infiltromètres à succion ont été faites il y a plusieurs années aux Etats-Unis (Constantz & Murphy 1986 ; Ankeny *et al.*, 1988).

I-2-b : Comment ?

Pour les mesures de niveau, il existe plusieurs capteurs disponibles sur le marché tels que les capteurs à ultrasons, les capteurs laser et les capteurs de pression. Notre choix s'est porté sur les capteurs de pression car les autres capteurs ne sont pas adaptés. En effet, il remonte des bulles en surface dans les réservoirs tout au long de l'expérience d'infiltration et cela pourrait interférer au niveau de la réception des signaux lumineux ou sonores.

Le modèle de capteur choisi est un capteur de pression différentielle à membrane déformable. Le choix s'est porté sur ce type de capteur car il n'influe pas sur le milieu de mesure et car il est déjà utilisé sur d'autres manipulations dans l'unité de Science du Sol.

Pour la mesure de niveau avec le capteur de pression on sait que pendant toute l'infiltration, la dépression reste constante dans le vase de Mariotte et égale à h_1 , mais que celle dans le réservoir d'alimentation varie en fonction de la hauteur d'eau qui s'est infiltrée dans le sol puisque ce réservoir est clos. Ceci implique donc qu'il y a une relation de proportionnalité entre le niveau de l'eau dans le réservoir d'alimentation et la différence de pression entre les deux réservoirs du TRIMS, à une constante près qui peut être déterminée par les conditions initiales.

Ce qui nous donne la relation suivante :

$$z(t) = \frac{1}{0.981} \times (p_1(t) - p_0) - C$$

avec z : niveau dans le réservoir d'alimentation (en cm)
 p_1 : pression dans ce même réservoir (en mbar)
 p_0 : pression dans le vase de Mariotte (en mbar)
 C : constante (en cm).

Cette relation peut encore se simplifier : en exprimant les pressions en cmCE (centimètre de colonne d'eau), on élimine ainsi le dénominateur.

Il s'agirait donc de relier chaque réservoir à une extrémité du capteur par l'intermédiaire de tubes capillaires et de jonctions étanches.

Le capteur utilisé délivre une tension qui varie en fonction de la différence de pression. Il est relié à une centrale d'acquisition dont le modèle est couramment utilisé à l'INRA et qui aura pour rôle non seulement de recueillir les mesures mais en plus de fournir le courant d'alimentation des capteurs.

En effet, le capteur de pression ne sera pas seul dans le boîtier. Sa réponse étant fonction de la température, on placera donc un capteur de température, une sonde platine PT100 en l'occurrence, pour pouvoir apporter une correction à la mesure.

Le choix de la PT100 est dû au fait qu'elle est peu encombrante, mais aussi au fait que son montage pour un branchement sur la centrale est simple et ne prend pas beaucoup de place.

I-3 : Les erreurs de mesures.

I-3-a : Définitions.

Le mesurage (valeur lue sur l'appareil) n'est toujours qu'une approximation de la valeur vraie du mesurande (objet à mesurer). On tente toujours d'estimer la différence entre ces deux valeurs qui est appelée erreur de mesure et qui se décompose en deux groupes : les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires. Les erreurs aléatoires peuvent être diminuées en effectuant un grand nombre de mesures. Quand aux erreurs systématiques, dues aux grandeurs d'influence, on les diminue par un étalonnage mais on peut uniquement les corriger par une estimation de différents termes tels que :

- la résolution, plus petite différence d'indication significative,
- la justesse, valeur (conventionnellement) vraie de la valeur à mesurer,
- la fidélité, l'instrument donne la même valeur pour une même grandeur sur plusieurs mesurages (sans forcément être juste),
- l'exactitude, juste et fidèle à la fois,
- la répétabilité, mesurage répété dans les mêmes conditions (méthode, instrument, observateur, conditions environnementales),
- la reproductibilité, mesurage répété aussi, mais dans des conditions différentes (observateur, méthode, ...),
- la dérive temporelle, variation du mesurage dans le temps.

La somme de ces erreurs (systématiques et aléatoires) est appelée incertitude type (ou composée) et s'exprime sous la forme d'un écart-type.

Il y a plusieurs méthodes pour évaluer cette incertitude :

- *la méthode type A*, méthode d'exploitation purement statistique d'une série de mesures (détermination de la moyenne et de l'écart type),

- la méthode type B, ne disposant pas d'une série de mesures, elle se base sur des données scientifiques telles que les certificats d'étalonnage, la lecture des affichages, les données fabricants, les résultats antérieurs, etc.

A partir de là, on peut calculer pour un résultat y l'incertitude type composée u_C qui tient compte de toutes les incertitudes évaluées par les méthodes A (u_A) et B (u_B), avec pour formule :

$$u_C(y) = \sqrt{u_{A\text{aléatoire}}^2(y) + \sum_{i=1}^n u_{B_i\text{noncorrélées}}^2(y) + \left(\sum_{j=1}^m u_{B_j\text{corrélées}}(y) \right)^2}$$

Pour ce qui est de l'incertitude élargie, il s'agit de l'intervalle dans lequel on peut espérer qu'il y ait une large fraction des valeurs. L'incertitude élargie est caractérisée par son facteur d'élargissement k :

$$U = k \times u_C(y)$$

Si les résultats des mesures suivent une loi normale, on aura dans l'intervalle :

- pour $k = 1$: 68.26% des valeurs
- pour $k = 2$: 95.45% des valeurs
- pour $k = 3$: 99.74% des valeurs

En élargissant cette incertitude, on montre le niveau de confiance que l'on a pour le résultat d'un mesurage. Au niveau européen, le facteur d'élargissement généralement employé est $k = 2$.

Enfin, on exprime le résultat d'un mesurage sous la forme :

$$Y = y \pm U$$

I-3-b : Détermination de l'erreur.

En ce qui concerne la chaîne de mesure placée sur le TRIMS, il faut connaître l'erreur sur la mesure, car il s'agit bien-sûr d'être aussi précis, si ce n'est plus qu'avec un relevé manuel.

Afin de déterminer cette erreur, nous disposons de plusieurs étalons, munis de leurs certificats d'étalonnages. Grâce à ces instruments, nous effectuerons une procédure d'étalonnage de la chaîne de mesure qui nous permettra, après traitement des données, d'avoir :

- une correspondance entre tension de sortie du capteur et hauteur d'eau,
- une correction de la mesure en fonction de la température,
- une évaluation de l'écart type résiduel ou écart-type expérimental.

A partir de là, nous aurons accès à l'incertitude composée puis l'incertitude élargie, et donc l'erreur commise sur la mesure d'une hauteur d'eau.

II : Matériels et méthodes.

II-1 : Conception.

II-1-a : Les capteurs.

Le capteur de pression (voir figure 2) :

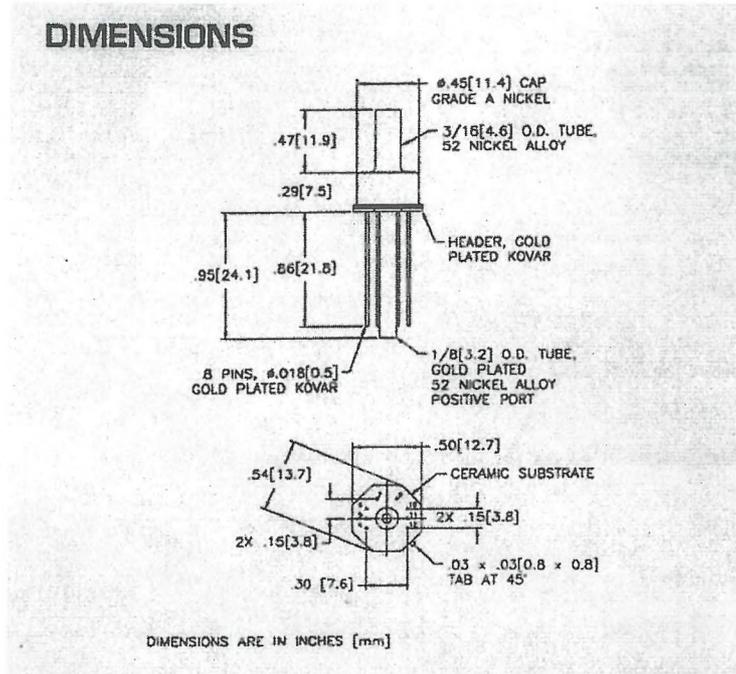


figure 2 : schéma du capteur de pression utilisé.

C'est l'élément central de la chaîne de mesure. Grâce à lui, le suivi de la hauteur d'eau dans le réservoir en fonction du temps pourra être effectué.

Le modèle choisi est le n°32 de l'entreprise EG&G IC SENSORS, capteur de pression différentielle dont la notice constructeur est fournie en **annexe 3**. Il a une étendue de mesure qui est de 2psi (pound per scare inch) ce qui correspond à environ 1.4 mCE, le double de ce que peut atteindre la différence de pression dans le TRIMS, ce qui nous laisse une assez bonne marge de sécurité.

Son principe de fonctionnement est assez simple. Il y a deux tubes en métal, que l'on branche sur les enceintes à comparer, séparés tous deux par une membrane piezorésistive en silicium montée dans un pont de Wheatstone. La différence de pression a pour effet de modifier l'impédance de la membrane et ainsi de créer une différence de potentiel dans le pont. On peut noter aussi que la tension de sortie fournie par le capteur sera donc proportionnelle à la tension d'entrée qu'on lui applique.

Le capteur possède six pattes, dont 4 seulement sont utilisées :

- 2 pour l'alimentation du capteur,
- 2 pour la tension de sortie du capteur, indicateur de la pression.

Les 2 pattes restantes ne sont pas utilisées car elles servent uniquement sur la chaîne de production pour divers tests.

Ce capteur sera monté dans un boîtier en PVC pour le protéger des chocs éventuels et surtout pour protéger ses pattes de connexion très fragiles.

Le capteur de température :

Ce capteur est une résistance de platine de 100Ω (PT100) de faible taille (2,3 par 2,0 mm, avec 10 mm de longueur de pattes), pour être insérée dans les circuits électroniques. Elle pourra donc être placée sous le capteur de pression, et donnera la température au plus près de celui-ci.

Cette PT100 suit la loi de variation DIN 43760 (cf. **annexe 4**) qui donne la résistance en fonction de la température. Dans la notice, le suffixe indiquant que la sonde est de classe A signifie que c'est une résistance de 100Ω à plus ou moins 0,06%.

II-1-b : La chaîne de mesure.

Le circuit de mesure de pression :

Le capteur de pression doit être alimenté sous un courant maximum de 1.5 mA et une différence de potentiels à l'entrée de 5 V maximum. On place donc entre le 12 V provenant des piles de la centrale et le capteur un transformateur de modèle TRACO TED 1211 fournissant une tension stabilisée continue de 5 V. Ce composant a été choisi car il a déjà fait l'objet d'études menées à l'INRA. Il a été testé au niveau de sa fiabilité en prévision d'être utilisé sur des expériences qui fonctionnent maintenant depuis quelques années sans aucun problème au niveau de ce transformateur.

On place ensuite un jeu de résistance entre le TRACO et le capteur de pression. Son rôle est d'adapter la tension d'entrée appliquée au capteur de pression pour que la pleine échelle de la tension de sortie du celui-ci soit égale au calibre de la voie d'acquisition de la centrale.

Afin de déterminer la valeur des résistances, on suit la méthode employée pour la réalisation des boîtiers de mesures WIND qui utilisent les mêmes capteurs de pression. Cette méthode, détaillée dans l'**annexe 5**, nous permet de connaître la résistance totale du jeu par des tests électriques lorsque le capteur est soumis à différentes pressions. On détermine ensuite parmi les résistances de précision disponibles (cf. **annexe 3**) l'association se rapprochant le plus de la valeur estimée de la résistance totale.

A la différence de WIND, on néglige l'emploi d'un potentiomètre d'ajustement, car la gamme des résistances de précision est très étendue et cela suffit pour s'approcher à l'Ohm près de la valeur désirée. En plus, son coefficient de variation thermique ($100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) est beaucoup trop grand pour le montage, du moins largement supérieur à celui des résistances garanti par le constructeur aux alentours de $15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Enfin pour ce qui est de la détermination de la hauteur d'eau, la centrale relève uniquement la tension de sortie du capteur, celle-ci est ensuite traitée sous Excel afin d'être convertie et corrigée.

Le montage pour la PT100 :

L'acquisition de la température avec une PT100 est une chose courante pour les centrales CAMPBELL. Les différents montages sont détaillés sur le manuel d'utilisation du modèle de centrale utilisé (CR21X).

Nous avons 3 montages disponibles :

- le montage demi-pont 3 fils (cf. **figure 3**),

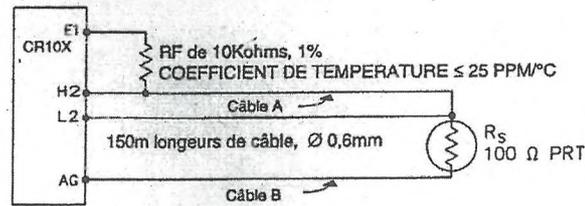


figure 3 : schéma de montage "demi-pont 3 fils" d'une PT100.

- le montage demi-pont 4 fils (cf. **figure 4**) :

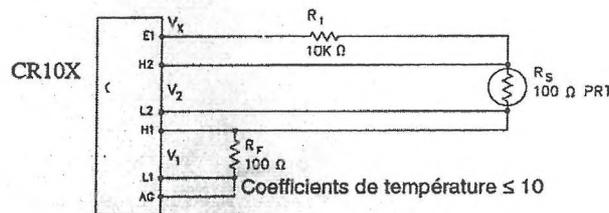


figure 4 : schéma de montage "demi-pont 4 fils" d'une PT100.

- le montage pont complet 4 fils (cf. **figure 5**) :

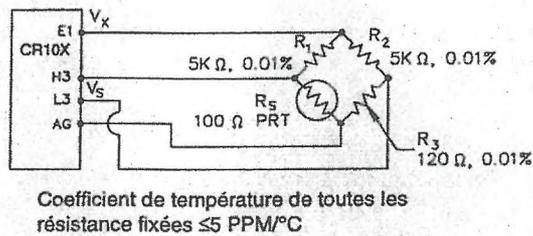


figure 5 : schéma de montage "pont complet 4 fils" d'une PT100.

Il est noté CR10X sur les schémas, mais le montage est rigoureusement le même pour la CR21X.

Pour notre dispositif, nous avons choisi d'utiliser le montage demi-pont 3 fils. Par rapport aux montage 4 fils, c'est celui qui prend le moins de place. De plus, le montage demi-pont 4 fils nécessite une voie de mesure différentielle supplémentaire et pour le montage pont complet 4 fils, le programme nécessite une instruction supplémentaire.

Le principe de la mesure avec le montage demi-pont 3 fils est de faire le quotient entre une mesure de tension dépendant de la température aux bornes de R_s et une autre variant très peu R_f . Cette valeur est ensuite convertie par la centrale grâce à une instruction particulière en une valeur de température.

On sait d'après la notice constructeur qu'il y aurait une erreur sur la valeur finale de température de $0,1^\circ\text{C}$, mais dans notre cas, nous avons simplement besoin d'une mesure qui

même si elle n'est pas vraie, nous permettra d'effectuer une correction sur la mesure de pression.

Le circuit imprimé (cf. figure 6 et photo 1) :

Ce circuit a été conçu pour accueillir tous les composants, ainsi qu'un support en Nylon pour le capteur de pression. Parmi les composants soudés au circuit, on peut noter :

- le TRACO,
- le jeu de résistances,
- la sonde platine, sous le capteur de pression,
- le bornier, sur lequel sont branchés les fils allant au capteur de pression,
- des picots pour brancher les fils allant à la centrale.

Le typon a été fait sur ordinateur grâce au logiciel Board Maker, puis imprimé sur transparent.

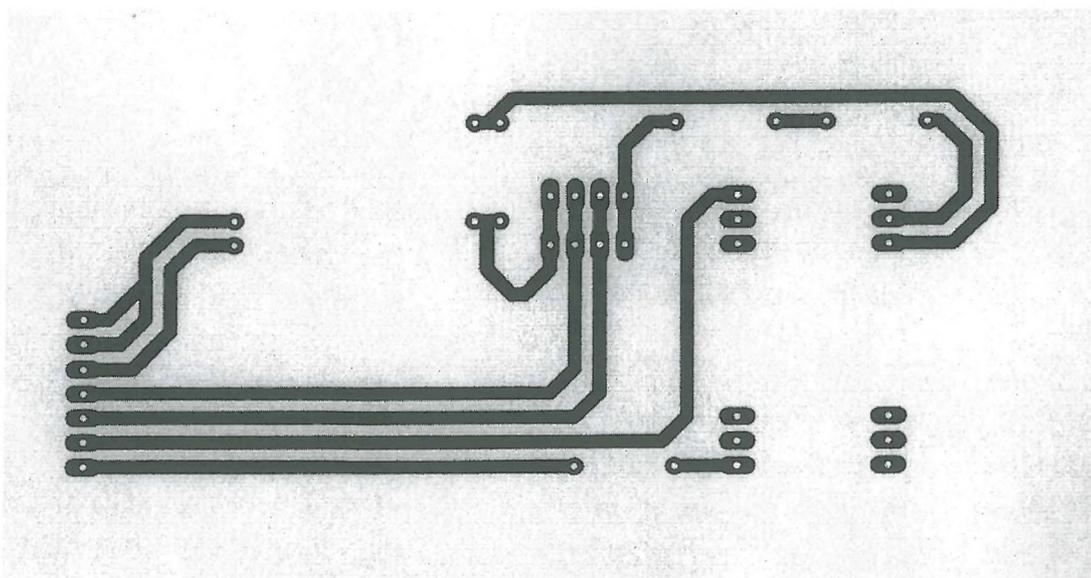


figure 6 : schéma du TYPON réalisé.

Les pistes du circuit ont ensuite été dévoilées grâce au procédé habituel :

- retrait du film protecteur,
- insolation de la résine photosensible recouverte du typon sous une lampe à ultraviolet,
- bain dans un révélateur, pour retirer la résine qui ne se trouvait pas sous le typon,
- bain dans le perchlore de fer, pour retirer le cuivre inutile,
- nettoyage de la résine avec de l'alcool.

Le circuit a ensuite été percé pour accueillir les composants. Les pistes ont été recouvertes d'une fine couche d'étain pour les protéger des chocs et améliorer leur conductivité, puis d'une couche de vernis pour une protection contre l'humidité de l'air ambiant.

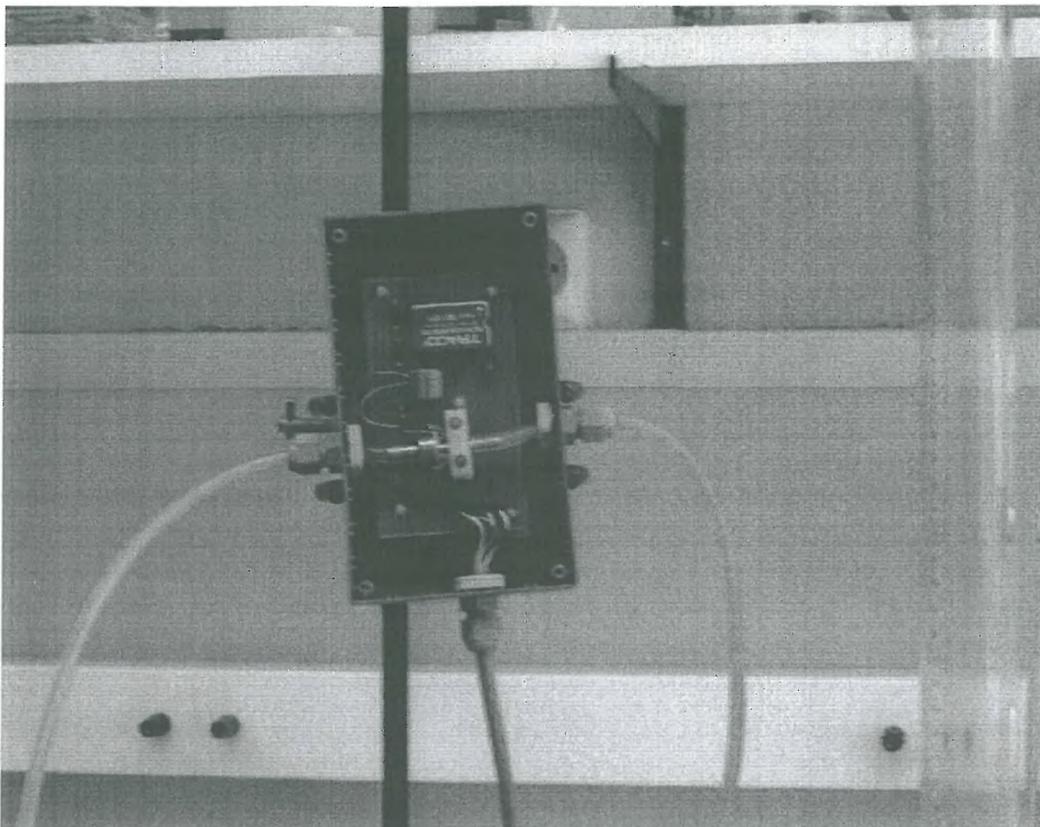


photo 1 : photo du circuit.

La centrale d'acquisition :

Le point de départ de la mesure est la centrale d'acquisition, modèle CR21X de CAMPBELL SCIENTIFIC LTD. C'est un appareil qui fonctionne indépendamment du secteur, il peut donc être utilisé sur le terrain. Elle est programmable, soit manuellement par l'intermédiaire de son pavé numérique, soit grâce à un logiciel sur ordinateur via une liaison RS232. Une fois que le programme est téléchargé, la centrale est autonome et effectue les mesures qu'elle stocke dans sa mémoire. On peut ainsi lancer une mesure et récupérer les données en fin d'expérience. Elle peut fournir du courant pour les montages électriques sous réserve qu'ils ne consomment pas plus de 12V, ce qui évite d'avoir une alimentation supplémentaire pour la chaîne de mesure.

Au niveau du programme, les instructions programmées concernent :

- l'intervalle de temps entre 2 exécutions du programme (2^{ème} ligne),
- une mesure de tension différentielle (instruction P2), car limite le bruit, pour la mesure de la tension du capteur de pression,
- une mesure de la tension de batterie (instruction P10), pour vérifier qu'elle ne sorte la gamme de conversion du transformateur alimentant le capteur,
- la mesure du montage demi-pont 3 fils (instruction P7),
- la conversion de cette mesure en température (instruction P16),
- l'affichage du temps (instruction P77), dont les instructions permettent d'afficher secondes, minutes, heures et jours séparément ou tous ensemble,
- le calcul du temps cumulé, Tpscum, à partir de la première exécution du programme, afin d'avoir un repère temporel plus simple que le real time et récupérable avec les mesures,
- le stockage des valeurs mesurées dans la mémoire de la centrale (instruction P70), précédé du (P86) configuré pour activer les indicateurs de sauvegarde.

Ce programme est disponible dans l'**annexe 6**, avec un détail de ces instructions.

II-1-c : Aspect d'ensemble (photo 2).

On place le circuit dans un boîtier en matière plastique, étanche (IP65), pour éviter les chocs et limiter l'entrée de l'humidité et de la poussière. Il a ensuite été percé pour accueillir trois presse-étoupes permettant le passage du câble à 7 fils reliant le circuit à la centrale, ainsi que des deux capillaires reliant le capteur au TRIMS.

Les connexions des capillaires sont effectuées avec soin au niveau de l'infiltromètre, afin d'éviter toute fuite, fuite qui fausserait les résultats de l'infiltration.

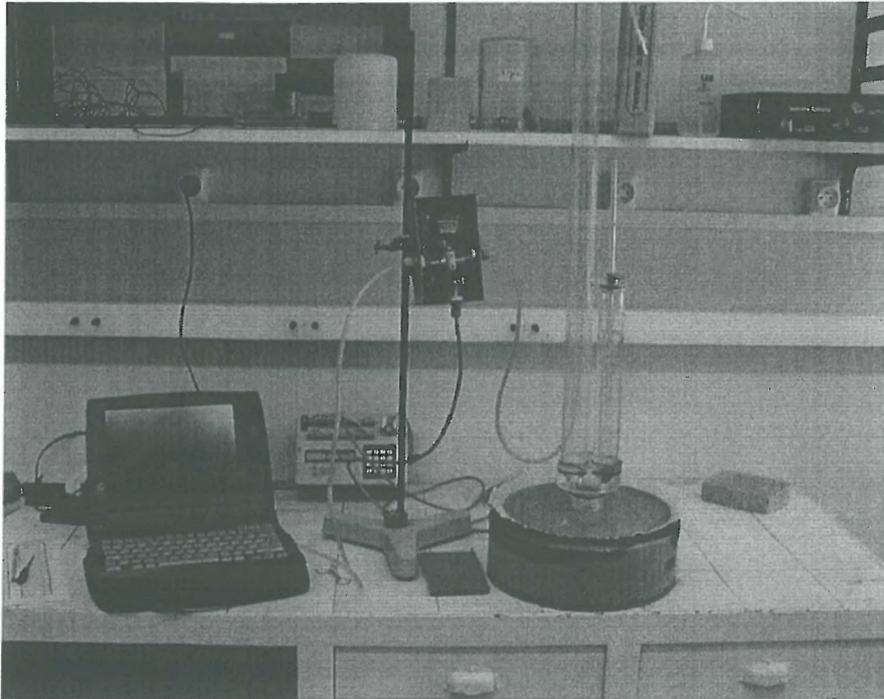


photo 2 : photo de la chaîne de mesure automatique.

II-2 : Les différentes sources d'erreurs possibles.

Les erreurs sur la mesure peuvent donc être provoquées par :

- la tension d'alimentation U_{alim} , provenant des piles de la centrale d'acquisition (8 piles de 1,5V), qui pourrait sortir de la gamme de tension admissibles par le TRACO (entre 9 et 12V),
- le convertisseur TRACO dont la tension de sortie dépend donc de la tension d'entrée mais aussi de la température,
- le jeu de résistances + le capteur, formant un tout, dépendant eux aussi de la tension d'entrée et de la température,
- la mesure de température donnée par le montage 3 fils de la résistance de platine,
- la précision de la centrale proportionnelle au calibre.

Afin d'évaluer ces erreurs, il faut se référer aux indications sur les notices constructeur :

- TRACO : précision de la tension de sortie $\pm 2\%$ équivalant à 0.1V,

- Centrale : erreur de mesure de 1 μV pour le calibre 15 mV et 3.33 μV pour le calibre 50 mV,
- étalon de température $\pm 0.11^\circ\text{C}$ à 2σ
- au niveau de l'étalon de pression, on sait uniquement qu'il y a une erreur de $\pm 1\text{mmCE}$, due à la précision du dernier digit

Nous avons effectué une série d'étalonnages du capteur de pression et de la PT100, permettant de voir l'influence réelle de la température sur la tension de sortie du capteur dans une gamme allant de 10 à 40°C.

II-3 : L'étalonnage.

II-3-a : Choix de la stratégie d'étalonnage.

Pour la réalisation de cet étalonnage, le laboratoire de métrologie de l'unité Science du Sol est assez bien équipé. Il est tout d'abord climatisé pour éviter les variations de températures au niveau de la pièce. Il possède une armoire climatique (dimensions intérieures : 80×110×50) dans laquelle la température peut aller de 5 à 45°C, un bain thermostaté (inutile pour nos manipulations), et des étalons de température et de pression. Ce dernier étant très pratique puisqu'il peut être configuré en mCE, ce qui évitera une conversion des résultats.

Il y a deux stratégies possibles pour cet étalonnage :

- la première consiste à réaliser un étalonnage de chaque élément de la chaîne de mesure séparément,
- la seconde consisterait à réaliser un étalonnage de toute la chaîne en même temps.

Les avantages et inconvénients de chacune des deux stratégies sont résumés dans le **tableau 1**.

	Etalonnage éléments par éléments	Etalonnage de toute la chaîne en même temps
Avantages	- réétalonnage plus rapide - interchangeabilité des composants	- simple - rapide
Inconvénients	- procédure d'étalonnage initiale assez longue	- changement de composant = réétalonnage complet

tableau 1 : avantages et inconvénients des différentes stratégies possibles d'étalonnage

Le choix se portera donc sur la seconde stratégie d'étalonnage car même s'il faut réétalonner en cas de changement de composant, cela ne dure que quelques jours et ne peut être que bénéfique compte tenu d'une éventuelle dérive temporelle des composants

II-3-b : Mise en œuvre.

L'étalonnage s'effectue de la manière suivante :

- on prend uniquement la chaîne de mesure, sans le TRIMS,
- on la place dans l'armoire climatique, que l'on règle à quatre températures successives (10 ;20 ;30 et 40°C),
- l'étalon de pression étant branché au capteur, il impose une série de pressions

- connues (0 ;150 ;300 ;450 ;600 et 750mmCE), pour chaque température,
- on relève aussi, grâce à la sonde de l'étalon de température placée à proximité du boîtier du capteur, une température de référence pour contrôler l'indication de la PT100. En effet, l'indication de l'armoire ne doit pas être prise en compte car il n'est pas sûr que la température soit répartie de manière homogène à l'intérieur,
 - le programme d'acquisition est quasiment le même que celui de mesure. Le temps d'acquisition est amené à 10s afin d'avoir le temps d'ajuster l'étalon de pression. On lui ajoute une mesure de tension différentielle pour l'étalon de température qui fournit 1mV pour 1°C. On relève donc la tension du capteur de pression, la température de référence, la température PT100, la tension de batterie et le temps cumulé (cf. **annexe 7**),
 - pour avoir des résultats exploitables et correct, il faut 30 valeurs de tensions pour chaque pression, ce qui correspond à 5 minutes, il faut donc noter les bornes de ces intervalles en temps cumulé, car entre chaque changement de pression les données ne doivent pas être prises en compte.

On récupère ensuite pour chaque température les données de l'étalonnage dans le PC, dont on modifie le format afin de pouvoir les traiter sous Excel.

III :Résultats et discussions.

III-1 : L'étalonnage.

Les données récupérées sur le PC doivent tout d'abord être identifiées, pour pouvoir être exploitées. Généralement, les variables sont ordonnées comme cela :

- l'indication du temps (real time) utilisant 3 colonnes (heures ; minutes ; secondes) inutiles puisqu'il y a le temps cumulé,
- puis toutes les autres variables dans leur ordre de programmation (tension du capteur de pression, tension de batterie, température de référence, tension de la PT100, température PT100 et temps cumulé).

La tension de batterie ainsi que le temps cumulé ne seront pas utilisés lors des calculs. La première sert à surveiller que l'on ne sorte pas de la gamme du TRACO, le second sert de repère pour trier les données relevées dans des intervalles de temps où la pression est stabilisée, des autres ne devant pas être prises en compte.

La comparaison des relevés de température PT100 et de température de référence, nous montre qu'il y a un écart constant d'environ 0.2 °C entre les deux. La température PT100 peut donc être considérée comme la température vraie car elle varie comme cette dernière. De plus la température servira uniquement lors de la mesure d'infiltration pour apporter une correction aux éventuelles dérives de l'indication du capteur en fonction de la température. Un étalonnage de la température PT100 en fonction de la température n'est donc pas nécessaire.

Par contre il faut tenir compte de celle-ci lors de l'évaluation de la pression. En effet, si l'on trace la succion réelle imposée au capteur en fonction uniquement des tensions du capteur aux différentes températures, les points ne sont pas suffisamment regroupés (**figure 7**), surtout pour les faibles pressions, et la fonction *DROITEREG* permet de calculer un écart-type résiduel d'environ 4 mmCE, beaucoup trop grand pour la mesure d'infiltration.

Cette fonction spécifique à Excel permet d'accéder à l'ordonnée à l'origine et à la pente d'une droite de régression linéaire, l'incertitude sur ces deux paramètres et à 6 paramètres statistiques. L'originalité de cette fonction est qu'elle n'est pas limitée au niveau du nombre de variables d'influences.

Ainsi elle peut effectuer une régression multiple et déterminer la succion P en fonction de la tension du capteur (U_{capteur}), de la température PT100 (T_{PT100}) et du produit ($U_{\text{capteur}} \cdot T_{\text{PT100}}$).

Le fait d'ajouter T_{PT100} et $U_{\text{capteur}} \cdot T_{\text{PT100}}$ permet une diminution notable de l'écart-type résiduel jusqu'à **0.79 mmCE**.

Ce qui fait une incertitude composée en tenant compte de l'erreur sur l'étalon de pression :

$$u_c = 1.27 \text{ mmCE}$$

Ce résultat, même s'il paraît élevé, reste bas par rapport à l'erreur sur la niveau avec un relevé manuel qui peut aller facilement jusqu'à 2 mm.

La relation d'étalonnage utilisée dans la suite de l'étude est :

$$P = a \cdot U + b \cdot T + c \cdot (U \cdot T) + d$$

avec P : pression en cmCE; U : tension en mV; T : température en °C; a, b, c, d : les coefficients de la régression donnés dans le **tableau 2**.

	a (cm mV ⁻¹)	b (cm °C ⁻¹)	c (cm mV ⁻¹ °C ⁻¹)	d (cm)
valeur	0.0904928	-0.00087194	0.00010404	-0.0639588
erreur type	2.658E-05	5.8844E-06	1.0353E-06	0.0001506

nombre de points de mesure : 740, R²=0.9999.

tableau 2 : valeurs des coefficients d'étalonnage utilisés.

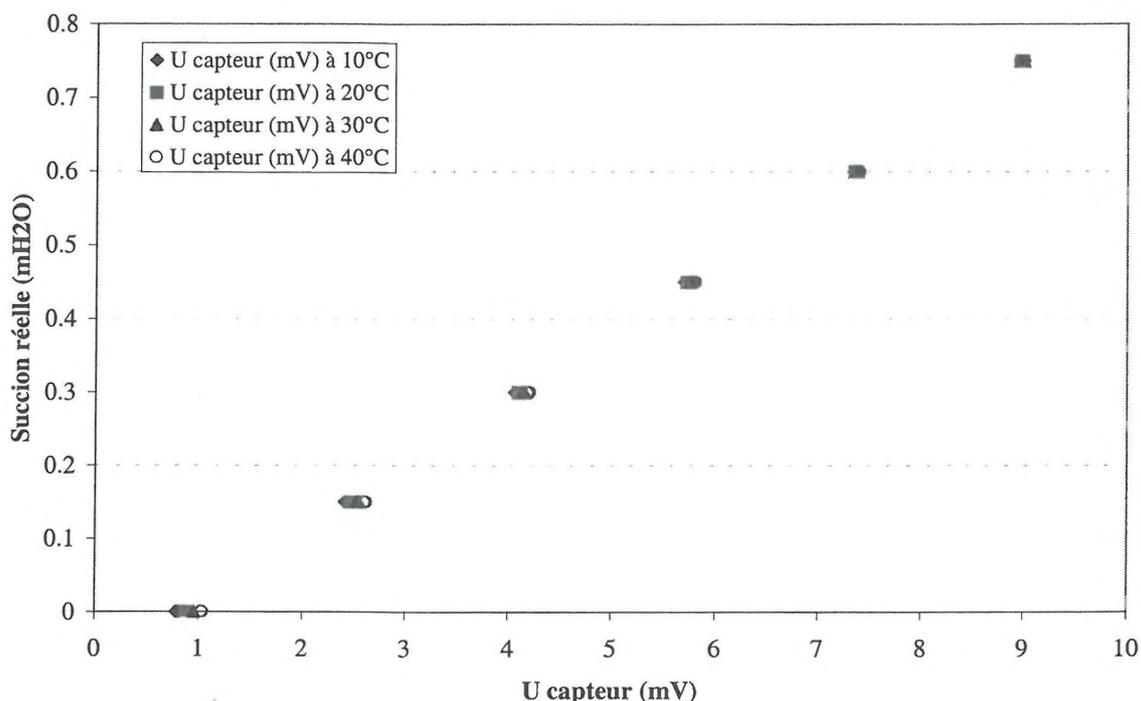


figure 7 : données de l'étalonnage du capteur de pression.

III-2 : Comparaison relevé manuel/relevé automatique.

Cette comparaison consiste à réaliser une mesure d'infiltration dans des conditions réelles sur un échantillon de sol, en effectuant à la fois un relevé manuel (ancienne méthode) et un relevé automatique avec la chaîne d'acquisition (**figure 8**).

Il a été réalisé deux essais :

- dans le premier (noté essai 1), la référence de pression du capteur n'était pas le vase de Mariotte mais la pression atmosphérique, car ce réservoir n'avait pas encore été usiné de manière à accueillir le capillaire le reliant au capteur,
- le second essai (noté essai 3) s'est très bien déroulé, avec cette fois la référence de pression dans le vase de Mariotte.

Au début du premier essai, juste après la pose du TRIMS sur le sol, il y eut un dépassement de calibre sur la voie de mesure de U_{capteur} , certainement due à une variation de la pression trop importante. Ce dépassement ne s'est pas reproduit lors du second essai. Il se pourrait que ça vienne de la couche de sable, celle-ci se trouvant à un potentiel hydraulique élevé a absorbé beaucoup d'eau en un bref instant, d'où remontée d'une grosse bulle dans le réservoir d'alimentation provoquant ce dépassement d'échelle.

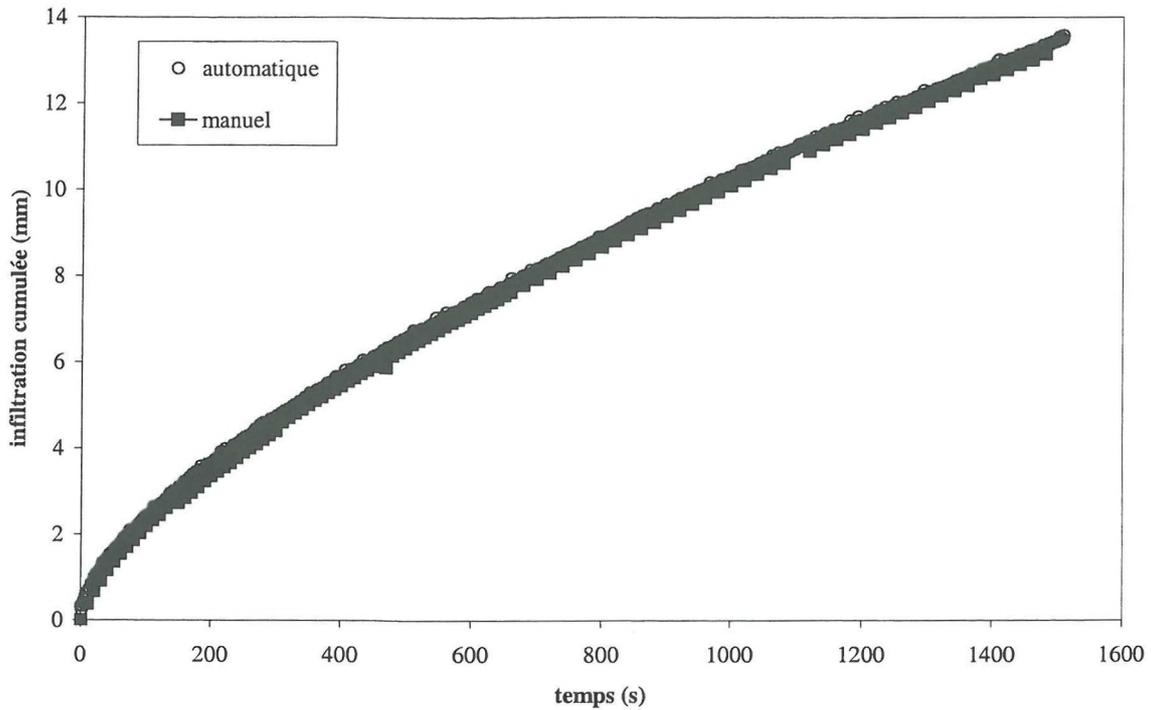


figure 8 : comparaison des quantités d'eau infiltrées calculées à partir des relevés manuels et automatiques pour l'essai 3.

La comparaison des deux méthodes de mesure peut aussi s'effectuer en traçant la variation de hauteur d'eau dans le réservoir de mesure relevée manuellement en fonction de celle relevée automatiquement (**figure 9**). La pente de cette droite est proche de 1 et l'ordonnée à l'origine proche de 0. Un test statistique de Student indique que la pente peut être considérée comme significativement différente de 1 (aux seuils de 5 et 1 %), alors que l'ordonnée à l'origine n'est pas significativement différente de 0.

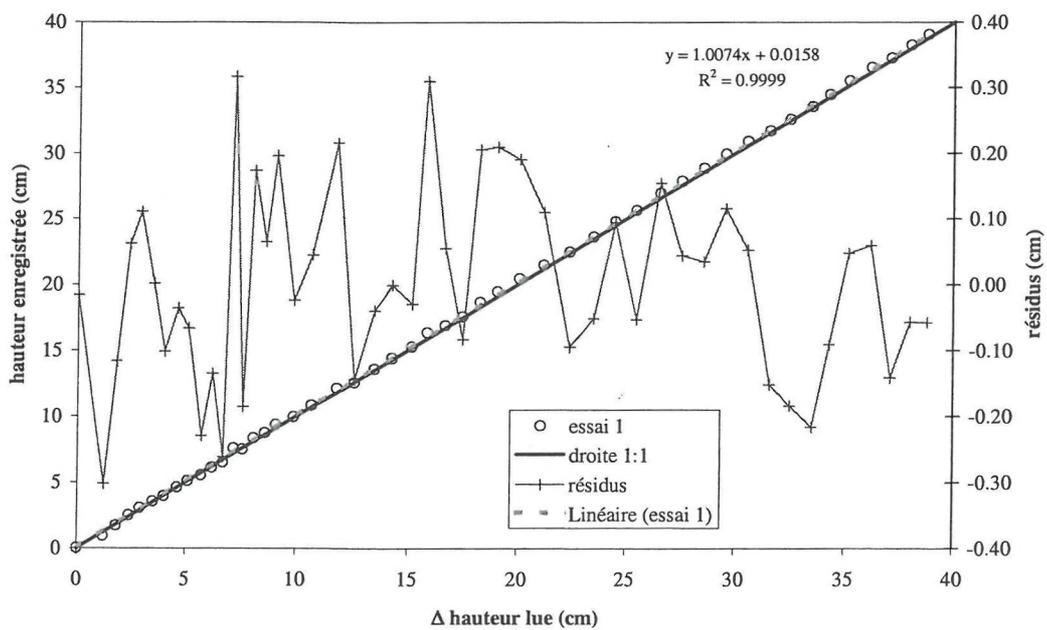


figure 9a

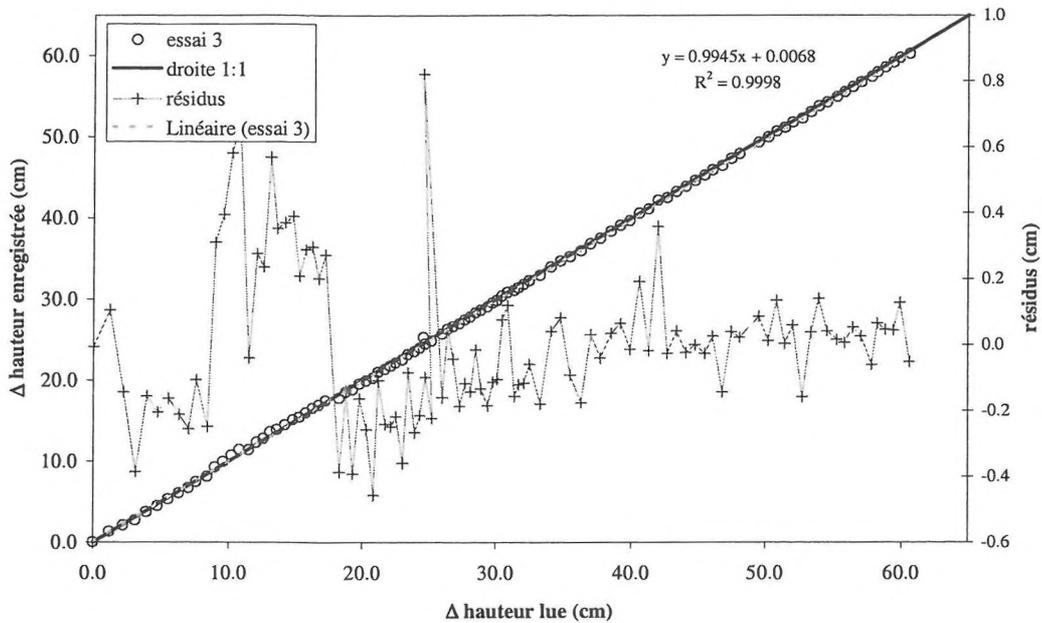


figure 9b

figures 9 : comparaison des variations de hauteur d'eau dans le réservoir de mesure calculées à partir des relevés manuels et automatiques pour l'essai 1 (fig. 9a) et pour l'essai 3 (fig. 9b).

Il faut souligner toutefois la présence d'un bruit sur le relevé automatique presque imperceptible sur le tracé des hauteurs d'eau en fonction du temps mais qui devient très important sur les tracés de flux infiltré par unité de surface toujours en fonction du temps (voir figure 10). Ce bruit n'est pas visible sur les relevés manuels car il provient certainement des bulles remontant dans le réservoir, dont on ne tient pas compte lors de la lecture du niveau. Il devient plus important en fin d'infiltration car le flux ralentit et devient sur une seconde (intervalle entre 2 mesures) inférieur à la résolution de la chaîne de mesure.

courbe pour la détermination du K

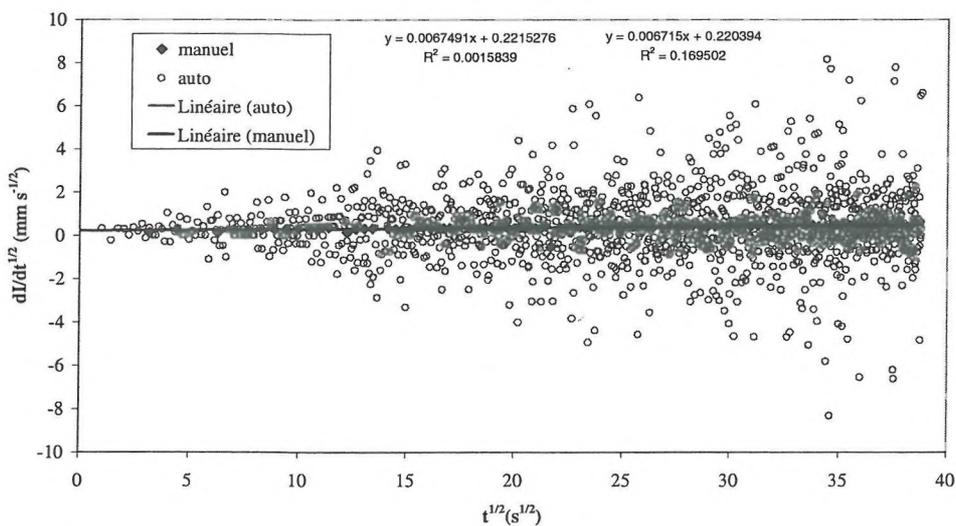


figure 10 : tracé de la courbe $\frac{dI}{d\sqrt{t}} = f(\sqrt{t})$ dont l'analyse permet de remonter aux propriétés hydrodynamiques (essai 3, pas d'acquisition automatique de 1s).

L'incertitude sur l'ajustement à partir de l'examen de la courbe représentée sur la figure 10 n'est pas diminuée si on augmente l'intervalle de temps entre deux mesures (en prenant une mesure sur dix par exemple).

III-3 : Conséquences sur le traitement des données.

La méthode d'exploitation classique consiste à tracer $\Delta I/\Delta t^{1/2}$ en fonction de $t^{1/2}$ avec ΔI qui représente la variation de flux cumulé d'infiltration et $\Delta t^{1/2}$ la variation de la racine carrée du temps, car il existe une relation mathématique entre ces deux grandeurs qui est :

$$\Delta I/\Delta t^{1/2} = S + 2Bt^{1/2} \quad \text{avec } S = \text{sorptivité capillaire.}$$

$$B = \frac{\gamma \times S^2}{r \times \Delta \theta} + \left(\frac{2 - \beta}{3} \right) K(h_0)$$

On prend généralement $\gamma = 0.75$ et $\beta = 0.6$. $\Delta \theta$ est la variation de teneur en eau sous le TRIMS (cette valeur est mesurée à l'aide de prélèvements de sol), r est le rayon de l'embase. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle fait intervenir les variations de flux pour lesquelles le bruit est le plus important (voir **figure 10**).

Il existe d'autres méthodes d'exploitation, notamment celle d'Haverkamp (Vanderveare, 1995), avec pour équation de départ :

$$I = S \times t^{1/2} + B \times t \quad \text{avec } S \text{ et } B \text{ représentant les mêmes choses que précédemment.}$$

Cette équation est la même que précédemment, mais non dérivée par rapport à $t^{1/2}$. Pour l'essai 3, elle est tracée sur la **figure 11**.

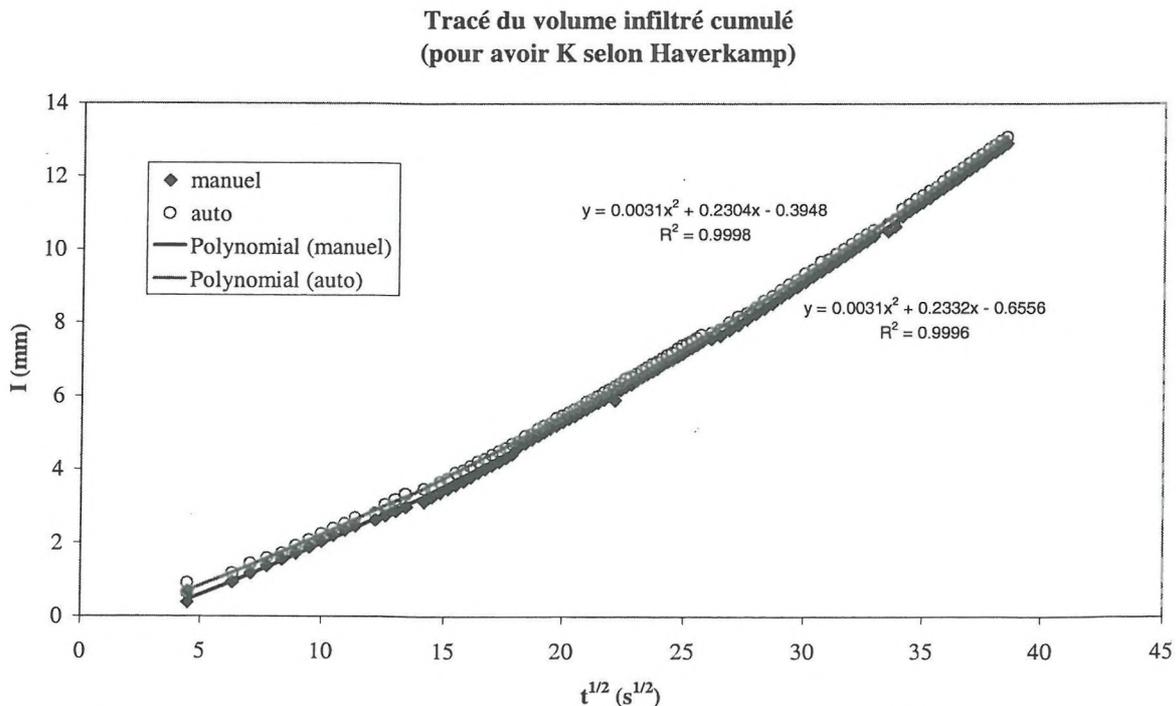


figure 11 : évolution de l'infiltration cumulée en fonction de $t^{1/2}$ pour l'essai 3.

L'avantage de cette méthode est qu'elle ne tient pas compte du bruit provoqué sur les mesures automatiques et on s'aperçoit finalement que les valeurs des paramètres hydrodynamiques du sol déterminés grâce aux relevés automatiques et manuels sont pratiquement identiques :

tiré des données:	manuelles	automatiques
S en mm/s ^{1/2}	0.2332	0.2304
K(h ₀) en mm/s	5.55 10 ⁻³	5.57 10 ⁻³

L'inconvénient de cette méthode, c'est qu'elle doit être utilisée sur un sol homogène or il a été placé une couche de sable sur le sol pour améliorer le contact entre le TRIMS et le sol. Il faut donc réduire au maximum l'épaisseur de la couche de sable et ne pas tenir compte des premiers relevés. Cet inconvénient disparaît lorsque l'on raisonne sur la quantité $\frac{dI}{d\sqrt{t}}$.

Le prototype conçu à l'INRA fonctionne donc correctement, les résultats de l'étalonnage sont satisfaisants, puisque l'incertitude sur la hauteur d'eau mesurée est inférieure à celle d'un relevé manuel. Cependant le traitement des données nous montre un bruit, qui était déjà présent mais supérieurs sur les mesures des américains (Ankeny *et al.*, 1988), cette différence provient sûrement de leur montage qui utilise deux capteurs de pression, au lieu d'un capteur de pression différentielle. Le point commun aux deux infiltromètres, c'est que l'arrivée d'air dans le réservoir d'alimentation se fait par acoup avec la remontée des bulles. Ce bruit n'y est pas sur les relevés manuels car lors de la lecture le manipulateur ne tient pas compte de la bulle. Mais ça pourrait venir également de la résolution trop faible du capteur.

CONCLUSION

Le projet d'automatisation de l'infiltromètre à succion a donc nécessité une étude préalable afin de déterminer le capteur à utiliser et le montage à réaliser de manière à obtenir une mesure automatique fiable du niveau d'eau dans le réservoir d'alimentation du TRIMS.

Il a donc fallu ensuite concevoir la chaîne de mesure et modifier l'infiltromètre pour qu'il l'accueille.

L'étalonnage de la chaîne de mesure a permis d'observer et de corriger l'erreur qu'entraîne une modification de température sur la mesure du capteur, mais aussi de déterminer que l'incertitude sur la mesure de niveau est satisfaisante car proche du mm d'eau et inférieure à l'incertitude de la mesure manuelle. Cependant, il reste le problème du bruit sur la mesure automatique, dont l'origine supposée serait les bulles remontant dans le réservoir d'alimentation.

Le dossier ne reste pas clos car il faut trouver un moyen de prouver que les bulles en sont bien la cause, et si c'est le cas, modifier la chaîne de mesure ou même le TRIMS dans le but de remédier à ce problème. Le premier point serait réalisable grâce à un générateur de bulle implanté dans une colonne d'eau et la visualisation du signal renvoyé par un capteur de pression. Pour le second point, une diminution du diamètre intérieur du tube en L entraînerait peut-être une diminution de la taille des bulles et arrivée de l'air dans le réservoir plus régulière. Mais tout cela reste encore à expérimenter.

BIBLIOGRAPHIE

ZAREMBA Grazyna, 1996. Etude critique de la mesure de l'infiltration sous succion avec un infiltromètre à disques. DEA Sciences de l'eau dans l'environnement continental. Université Montpellier II.

RAMANDA Hanta Nirina, 1995. Mesure de l'infiltrabilité de la croûte superficielle du sol : estimation des caractéristiques hydrodynamiques à des potentiels voisins de zéro et étude de leur variation sous l'effet des pluies. Ecole Nationale du Génie de l'eau et de l'environnement. Strasbourg.

VANDERVAERE Jean-Pierre, 1995. Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques. Analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés. Thèse de doctorat, Université de Grenoble I.

GAUDU J.C. et al., METHODE DE WIND, notice technique.

CAMPBELL SCIENTIFIC LTD, 1984. 21X Micrologger operator's manual.

ZELSMANN H.R., 1999. Cours de métrologie, IUT Mesures Physiques. Grenoble.

CONSTANTZ J. et MURPHY F., 1986, AN AUTOMATED TECHNIQUE FOR FLOW MEASUREMENTS FROM MARIOTTE RESERVOIRS. Soil Sci. Soc. Am.J. 51:252-254

ANKENY M. D. et al., 1988. DESIGN FOR AN AUTOMATED TENSION INFILTRIMETER, Soil Science Society of America Journal, 52, 893-896.

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche de mise en œuvre (mesure avec le TRIMS).

Annexe 2 : Fiche de protocole du TRIMS.

Annexe 3 : Données constructeur des éléments de la chaîne de mesure.

Annexe 4 : Norme DIN 43760.

Annexe 5 : Détermination du jeu de résistances selon la méthode WIND.

Annexe 6 : Programme d'acquisition de mesure d'infiltration.

Annexe 7 : Programme d'acquisition pour l'étalonnage.

ANNEXE 1

Fiche de mise en œuvre

Conductivité Hydraulique Proche de la Saturation par la méthode de l'infiltromètre à disque sous succion

Cette fiche vient en complément de la **fiche protocole** qui traitait des aspects théoriques et du principe de la mesure. Elle décrit précisément le matériel nécessaire à la méthode et la mise en œuvre détaillée de la mesure.

Matériel nécessaire :

- Mallette bleue contenant le TRIMS :
 - trois réservoirs de mesure avec leur bouchon ;
 - trois embases avec :
 - leur joint torique,
 - leur grillage,
 - leur toile nylon,
 - leur bouchon néoprène ;
 - un réservoir permettant le réglage de la succion, avec son couvercle muni d'un joint torique, un écrou en cuivre et un petit joint torique permettant le serrage du tube de réglage de la succion, et le tube de réglage de la succion ;
 - un porte réservoirs qui se place sur l'embase, avec ses 3 joints toriques, un écrou en cuivre et un petit joint torique permettant le serrage du tube en L reliant le réservoir de mesure au réservoir de réglage de la dépression ;
 - un tube en L ;
 - une pince ;
 - trois pieds et leur support (inutiles ...) ;
 - une seringue et un tube souple ;
 - un tube de graisse silicone ;
 - une pissette ;
 - une réglette ;
 - des fiches de mesure.
- Matériel annexe pour la mise en place :
 - une bassine ;
 - un réservoir de 10 l d'eau dégazée ;
 - de la toile nylon de rechange ;
 - une paire de ciseaux ;
 - un couteau ;
 - un pinceau ;
 - du sable S33 ;

trois anneaux de garde, correspondant aux trois embases différentes, permettant la mise en place de la couche de sable ;
une crémaillère et des pinces ;
un niveau à bulle ;
un chronomètre ;
du papier absorbant de type "sopalin" permettant d'initier l'écoulement à travers la toile nylon ;
un transparent et un feutre adapté permettant de noter a posteriori la forme de la tâche saturée à la surface du sable ;

- Pour les prélèvements annexes :
 - des boîtes pour les prélèvements gravimétriques ;
 - une tarière ;
 - des cylindres pour les prélèvements pour la densité apparente (voir fiche correspondante).

Mise en place du TRIMS :

La description de la mesure s'inspire de la fiche rédigée par Cl. Jeandet.

- La mesure TRIMS :
 - 1/ mettre en place sur l'embase la toile nylon sous l'eau,
 - 2/ retourner l'embase et la boucher avec un bouchon néoprène,
 - 3/ sortir l'embase de l'eau, ajuster très précautionneusement la toile nylon afin d'éviter la formation de plis,
 - 4/ replonger l'ensemble sous l'eau et aspirer avec la seringue les petites bulles d'air qui sont piégées sous la toile nylon,
 - 5/ laisser l'embase sous l'eau et retirer le bouchon,
 - 6/ assembler le porte réservoir avec le tube en L : serrer l'écrou en cuivre à la main,
 - 7/ insérer le réservoir de réglage de la succion : utiliser un peu de graisse silicone,
 - 8/ remplir ce réservoir de réglage avec la pissette,
 - 9/ assembler sous l'eau l'embase et le porte réservoir : utiliser un peu de graisse silicone,

Titre:
Cr   par:
Date de création:

INRA Avignon, Unité de Science du Sol

- 10/ mesurer et noter la distance entre le bas du tube en L et la toile nylon (h_2),
- 11/ remplir le réservoir de mesure et le boucher,
- 12/ assembler sous l'eau le réservoir de mesure sur le porte réservoir : utiliser un peu de graisse silicone,
- 13/ préparer la fiche de mesure,
- 14/ préparer la surface du sol (nettoyage, reboucher les fissures, planéité),
- 15/ mettre en place la couche de sable S33 en s'aidant de l'anneau de garde, vérifier sa planéité, retirer l'anneau de garde, mesurer et noter l'épaisseur (e) de la couche de sable,
- 16/ mettre le réservoir de réglage de la succion à la pression atmosphérique en remontant le petit tube jusqu'à entrée d'air et le redescendre d'environ 1 cm (formation d'un ménisque à la sortie du tube)
- 17/ régler la succion voulue en descendant le tube, serrer l'écrou de cuivre à la main et noter la hauteur h_1 ,
- 18/ installer le TRIMS sur la crémaillère, vérifier la verticalité,
- 19/ amorcer le passage à travers la toile nylon avec du papier absorbant,
- 20/ noter la hauteur d'eau dans le réservoir de mesure,
- 21/ poser délicatement et verticalement le TRIMS sur le sable : la première bulle dans le réservoir de mesure marque le temps zéro, déclencher le chronomètre,
- 22/ noter sur la feuille de mesure le temps de passage du niveau d'eau dans le réservoir de mesure devant les différentes graduations,
- 23/ à la fin de la manip, remonter le TRIMS et noter sur le transparent la forme de la tâche saturée à la surface de la couche de sable.

Précautions :

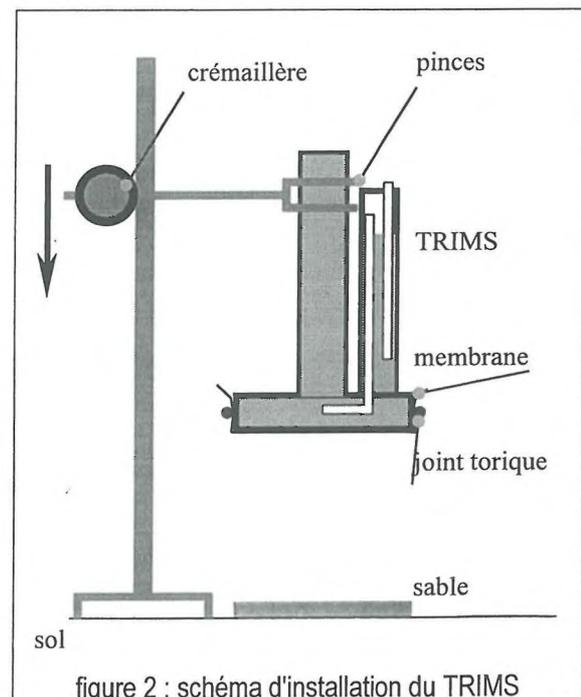
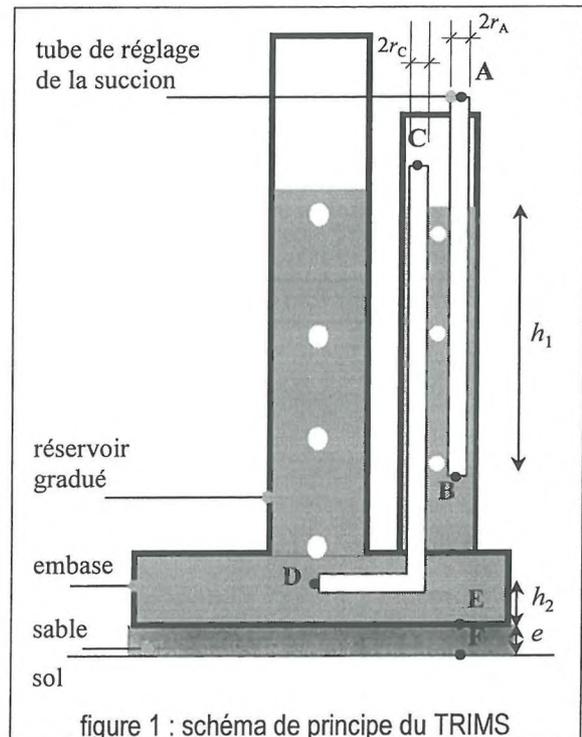
changer les toiles nylon fréquemment,
surveiller au cours de la manip l'apparition de fuites (entrées de bulles d'air dans le TRIMS) : le cas échéant, les colmater rapidement avec de la graisse silicone.

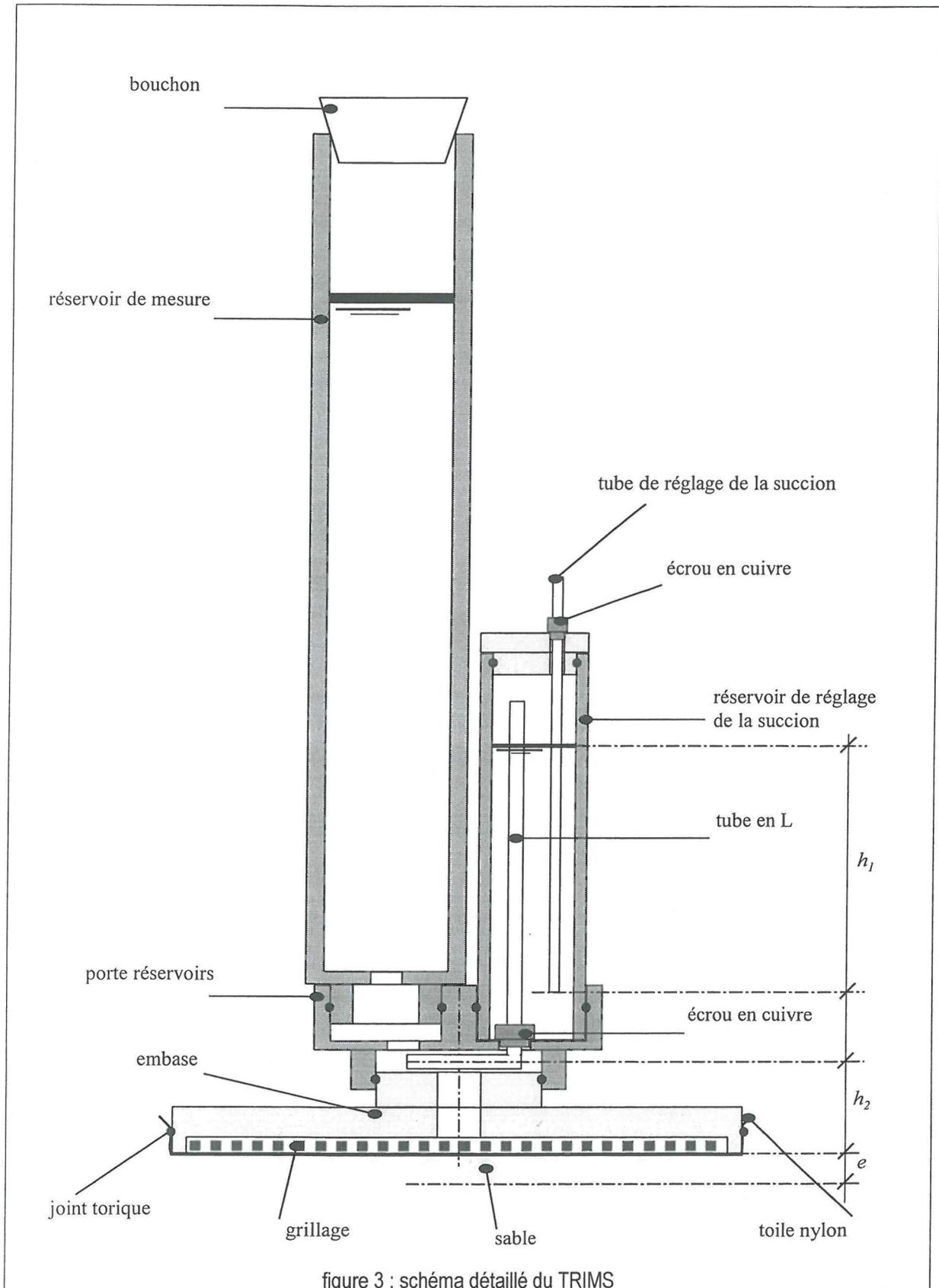
• Les prélèvements :

au début de la manip, faire des prélèvements (gravimétrie et densité apparente) à proximité de la placette d'essai. Faire trois profils sur une trentaine de cm de profondeur, avec un pas de quelques cm ;

à la fin de la manip, enlever le sable et faire les mêmes prélèvements au niveau de la placette de mesures.

Figures :





Titre:
 Créé par:
 Date de création:

ANNEXE 2

Fiche de protocole du TRIMS.

Conductivité Hydraulique Proche de la Saturation par la méthode de l'infiltromètre à disque sous succion

La courbe de conductivité hydraulique proche de la saturation est un paramètre important pour prédire les mouvements de l'eau dans le sol. Cette courbe peut être déterminée avec la méthode décrite ici lorsque le sol est homogène horizontalement et verticalement en terme d'humidité et de densité, et que les conditions d'applications de la loi de Darcy sont satisfaites.

Introduction :

La formation du ruissellement dépend en premier lieu de la capacité d'infiltration des premiers centimètres de sol au voisinage immédiat de la saturation (quelques mbar de succion). L'infiltromètre à succion multidisques (TRIMS) permet d'accéder à la courbe de conductivité et à la sorptivité des premiers cm de sol. Le principe de la méthode est décrit ci-dessous.

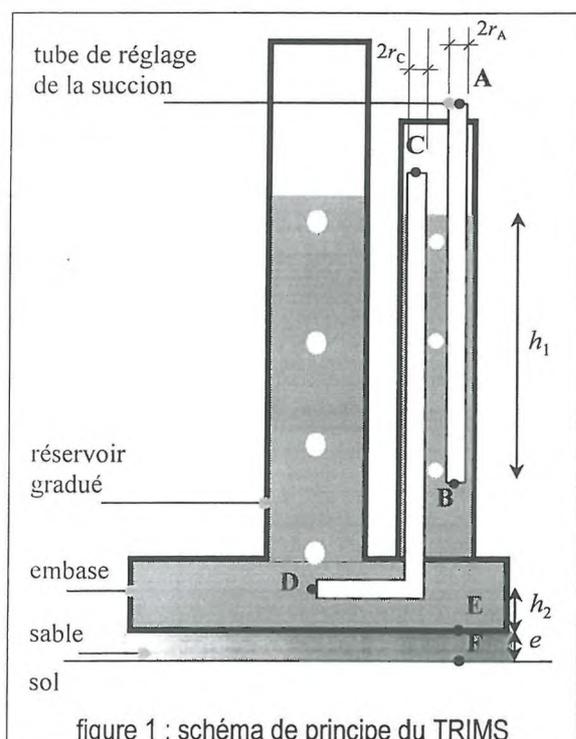


figure 1 : schéma de principe du TRIMS

Le principe est d'apporter de l'eau à la surface du sol sous une succion contrôlée. Typiquement, la gamme des potentiels utilisés varie de -15 cm

d'eau (-15 mbar) à 0 cm, soit la saturation. Le schéma du TRIMS est donné en figure 1.

L'opérateur enregistre les variations au cours du temps du niveau d'eau dans le réservoir (voir fig. 1). Ces variations sont converties en variations de volumes (connaissant la section intérieure du réservoir) puis en hauteur d'eau infiltrée (connaissant la section de l'embase). L'obtention de la courbe de conductivité et de la sorptivité se fait à partir de l'examen de la hauteur d'eau infiltrée au cours du temps. Des équations et des méthodes de résolutions différentes peuvent être trouvées dans la littérature (voir thèse de Vandervaere, 1995) suivant que l'on considère le "début" de l'infiltration (régime transitoire) ou la fin de l'infiltration lorsque le régime permanent est supposé être atteint. En pratique, le régime permanent n'est jamais atteint et les auteurs parlent de régime pseudo-permanent. Dans la suite, nous utiliserons les équations développées par Haverkamp et al. (1994) et les méthodes de résolutions proposées dans la synthèse de Zaremba (1996) adaptées à l'interprétation des données acquises lors du régime transitoire. En annexe, on trouvera les méthodes possibles si on souhaite utiliser le régime permanent.

Théorie :

• Equation d'infiltration :

On note I_{3d} la quantité d'eau cumulée (en mm) qui s'est infiltrée dans le sol. Cette quantité évolue en fonction du temps t suivant la relation (Haverkamp et al., 1994) :

$$I_{3d} = S \cdot \sqrt{t} + (A + B) \cdot t \quad [1]$$

avec :

$$A = \left(\frac{2 - \beta}{3} \right) \cdot K(h_0) \quad [2]$$

$$B = \frac{\gamma \cdot S^2(h_i, h_0)}{r \cdot (\theta(h_0) - \theta(h_i))} \quad [3]$$

où β est une constante et vaut approximativement 0.6, γ prend la valeur 0.75, K est la conductivité du sol, h_0 est le potentiel hydrique appliqué par

Titre:
Créé par:
Date de création:

INRA Avignon, Unité de Science du Sol

l'intermédiaire du TRIMS, h_i est le potentiel initial du sol, θ est la teneur en eau et S est la sorptivité. Cette équation suppose que $K(h_i) \ll K(h_0)$, et donc que le sol est initialement "suffisamment sec".

- Calcul du potentiel appliqué h_0 :

Le potentiel h_0 est calculé en supposant que l'équilibre hydrostatique est réalisé entre les différents points marqués sur la fig. 1.

Si on néglige les phénomènes de tension superficielle, la pression en A est égale à la pression en B, et les pressions en C et D sont identiques. Dans ce cas, on a :

$$h_0 = e + h_2 - h_1 \quad [4]$$

Dans cette relation h_2 est fixe et invariable, e est égale à l'épaisseur de la couche de sable et h_1 peut être ajusté par l'opérateur par l'intermédiaire du tube de réglage de la succion.

Si on prend en compte les phénomènes de tension superficielle, la relation [3] devient, en considérant un angle de contact eau-verre de 0 rad :

$$h_0 = e + h_2 - h_1 - \frac{2 \cdot \sigma}{\rho_w \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_C} \right) \quad [5]$$

où g est la gravité, ρ_w est la masse volumique de l'eau et σ la tension superficielle. A 20 °C, σ vaut $72.75 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ (*Handbook of Chemistry*, ed. de 1996). Pour un rayon de 2 mm, la correction apportée par l'effet capillaire est de 1.5 cm.

Matériel et Méthodes:

- Matériel :

Le TRIMS est rempli d'eau dégazée. Une membrane souple est installée sous l'embase et est retenue par un joint torique. Cette installation se fait sous l'eau afin de ne pas emprisonner de bulles d'air entre l'embase et cette membrane.

Une couche peu épaisse de sable fin est épanchée à la surface du sol sur une section égale exactement à la section de l'embase (utilisation d'un gabarit) : elle a pour but d'améliorer le contact entre l'embase et le sol. Les petites fissures doivent être préalablement bouchées ou isolées afin de ne pas les remplir de sable, ce qui augmenterait artificiellement la surface de contact alimentée en eau.

Le TRIMS est posé délicatement et parfaitement vertical (on peut utiliser un guide vertical et une crémaillère : voir fig. 2) à la surface de cette couche de sable : le chronomètre est déclenché à cet instant. L'opérateur enregistre alors l'évolution du niveau d'eau dans le réservoir au cours du

temps en enregistrant les temps de passage du ménisque devant les graduations du réservoir. L'expérience est arrêtée lorsque le régime pseudo-permanent semble s'être installé, ce qui peut prendre de 30 mn à plusieurs heures. On a ainsi obtenu la courbe expérimentale correspondant à l'eq. [1].

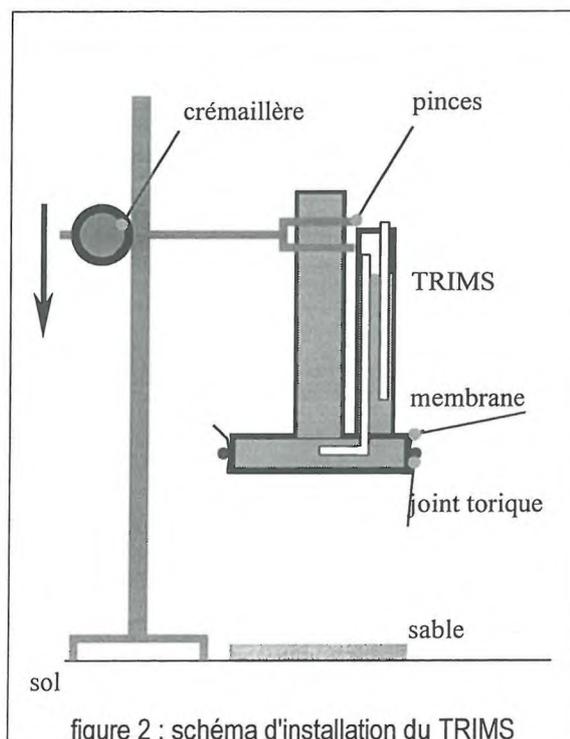


figure 2 : schéma d'installation du TRIMS

Des profils de teneur en eau initiale doivent être effectués à proximité de la zone de mesure sur les vingt premiers cm. Ces prélèvements devant permettre de définir la teneur en eau volumique initiale, il faut faire des prélèvements permettant le calcul de la teneur en eau pondérale mais également de la densité apparente (voir fiches protocoles correspondantes).

A la fin de l'expérience, on reporte sur un transparent la forme horizontale de la couche de sable, ce qui permettra de calculer précisément l'aire du contact sable-sol, et on effectue également un profil de teneur en eau sur les 20 premiers cm.

- Méthodes de résolution :

Ces méthodes utilisent le régime transitoire d'infiltration durant lequel les hypothèses d'homogénéité ont le plus de chance d'être respectées.

Méthode "mono-test transitoire"

Le calcul de $K(h_0)$ ne se fait pas directement à partir de [1]. En dérivant [1] par rapport à \sqrt{t} , on obtient :

$$\frac{dI_{3d}}{d\sqrt{t}} = S + 2 \cdot (A + B) \cdot \sqrt{t} \quad [6]$$

L'évaluation du terme de gauche dans [6] se fait expérimentalement à partir de la variation de hauteur d'eau dans le réservoir entre 2 mesures successives. On trace ensuite la relation expérimentale :

$$\frac{\Delta I_{3d}}{\Delta\sqrt{t}} = f(\sqrt{t}) \quad [7]$$

Les coefficients de la régression linéaire entre $\frac{\Delta I_{3d}}{\Delta\sqrt{t}}$ et \sqrt{t} donneront directement S (ordonnée à l'origine) et la quantité $2(A+B)$ (la pente). La relation [3] permet de calculer B à partir de S , et donc la quantité A . Finalement, la conductivité $K(h_0)$ est estimée à partir de [2].

Méthode "multi-rayon transitoire"

On procède initialement comme précédemment en traçant la relation [7]. D'après la relation [2], A ne dépend que de la succion appliquée, alors que B dépend également du rayon de l'embase. La méthode consiste donc à faire plusieurs expériences avec des embases de rayons différents.

Notons p_i la pente obtenue à partir de la régression effectuée sur la relation [7] durant l'expérience i avec l'embase de rayon r_i . On a :

$$p_i = 2 \cdot (A + B_i) \quad [8]$$

Si l'on dispose de 2 embases de rayon r_1 et r_2 , l'introduction de [3] dans [8] donne :

$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_1 \cdot p_1 - r_2 \cdot p_2}{r_1 - r_2} \quad [9]$$

$$S = \sqrt{\frac{\theta(h_0) - \theta(h_i)}{\gamma} \cdot \frac{p_1 - p_2}{2} \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1}} \quad [10]$$

Si on dispose d'au moins trois rayons différents, il suffit de tracer p_i en fonction de $\frac{1}{r_i}$: l'ordonnée

à l'origine de la régression effectuée sur ces données fournira directement la quantité $2A$, la

pente fournira la quantité $\frac{2 \cdot \gamma \cdot S^2}{\theta(h_0) - \theta(h_i)}$.

Ces expériences se font obligatoirement à des emplacements différents, ce qui pose le problème

de la non-prise en compte de l'hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques du sol.

Résultats :

Des exemples de résultats sont présentés sur les figures 3 et 4. Ces résultats ont été obtenus sur le domaine expérimental INRA des Vignères (84) sur un sol avec une forte proportion d'argile gonflante.

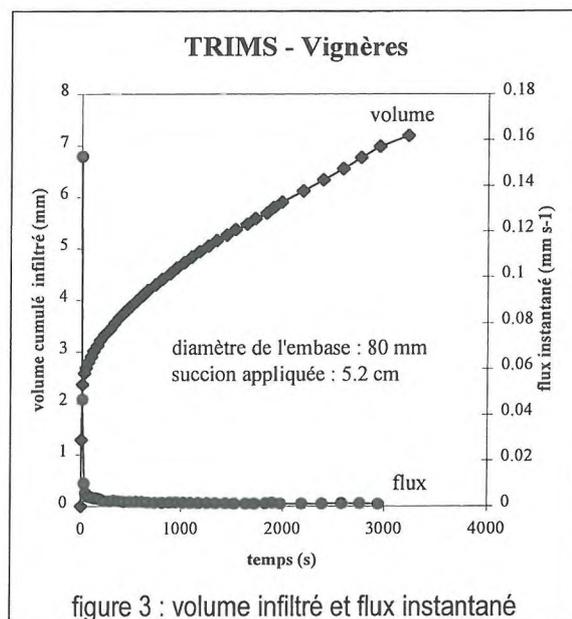


figure 3 : volume infiltré et flux instantané

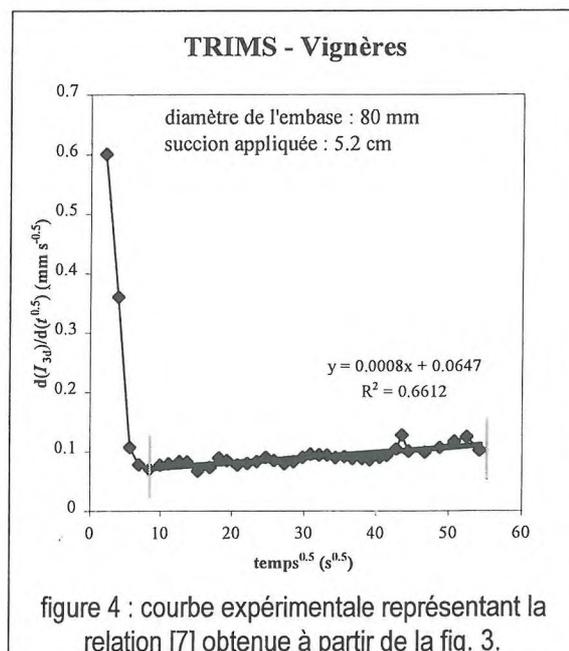


figure 4 : courbe expérimentale représentant la relation [7] obtenue à partir de la fig. 3.

Conclusions :

La méthode est très sensible aux conditions expérimentales, mais également à la méthode utilisée pour le calcul de la conductivité hydraulique. D'autres méthodes peuvent

s'appliquer si on raisonne sur le régime pseudo-permanent : le lecteur est renvoyé à la lecture de la thèse de Vandervaere (1995) pour plus de détails.

L'étude de Zaremba (1996) a montré que le contact embase-sable doit être de bonne qualité et que la présence de bulles d'air piégées entre la membrane et la couche de sable conduit à des estimations aberrantes de la sorptivité et de la conductivité. Ces deux points doivent donc être particulièrement soignés lors de l'utilisation au champ du TRIMS.

Références :

Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J. and Parlange, J.Y., 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc-infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, 30, 2931-2935.

Vandervaere, J.P., 1995. Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques. Analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble - INPG, 329 p.

Zaremba, G., 1996. Etude critique de la mesure de l'infiltration sous succion avec un infiltromètre à disques. Rapport de DEA, Université Montpellier II, 61 p.

Annexe(régime permanent) :

Le flux d'infiltration à travers une surface circulaire de rayon r , alimentée en eau sous une succion h_0 tend vers un régime permanent q_0^∞ :

$$q_0^\infty = K(h_0) + \frac{4 \cdot \Phi}{\pi \cdot r} \quad [A1]$$

où Φ est le potentiel de flux matriciel défini par :

$$\Phi = \int_{h_i}^{h_0} K(h) dh \quad [A2]$$

Suivant la méthode de résolution utilisée, on suppose que la conductivité et le potentiel sont liés par une relation exponentielle :

$$K(h) = K_{sat} \cdot e^{\alpha \cdot h} \quad [A3]$$

L'équation de Wooding [A1] s'écrit alors :

$$q_0^\infty = K(h_0) + \frac{4 \cdot b \cdot S^2(h_0, h_i)}{\pi \cdot r \cdot (\theta(h_0) - \theta(h_i))} \quad [A4]$$

avec $b=0.55$ et :

$$\Phi = \frac{b \cdot S^2}{\theta_0 - \theta_i} \quad [A5]$$

Méthode de résolution multi-rayons permanent

On utilise l'équation [A1] pour plusieurs rayons : le flux permanent dépend du rayon, alors que la conductivité en est indépendante ainsi que le potentiel de flux matriciel. Si on utilise au moins 3 rayons différents (donc à trois endroits différents), on peut tracer la courbe :

$$q_0^\infty(r) = f\left(\frac{1}{r}\right)$$

L'ordonnée à l'origine de la régression linéaire effectuée sur cette courbe donne $K(h_0)$, et la

pende donne la quantité $\frac{4 \cdot \Phi}{\pi}$.

Si on utilise seulement 2 rayons, on fait un calcul direct et on obtient :

$$K(h_0) = \frac{q_0^{\infty, r_1} \cdot r_1 - q_0^{\infty, r_2} \cdot r_2}{r_1 - r_2}$$

$$\Phi(h_0, h_i) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{q_0^{\infty, r_1} - q_0^{\infty, r_2}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$$

Méthode de résolution multi-potentiels permanent

La combinaison de [A1], [A2] et [A3] donne, en négligeant la conductivité initiale par rapport à la conductivité finale :

$$q_0^\infty = K_{sat} \cdot e^{\alpha \cdot h_0} \cdot \left(1 + \frac{4}{\pi \cdot \alpha \cdot r}\right)$$

K_{sat} et α étant inconnus. On fait plusieurs expériences avec des valeurs croissantes de h_0 , et on trace la courbe :

$$\ln(q_0^\infty) = f(h)$$

La valeur de la pente fournit α , l'ordonnée à l'origine fournit K_{sat} .

La courbe obtenue est rarement une droite car l'équation [A3] est rarement vérifiée : α dépend de h .

ANNEXE 3

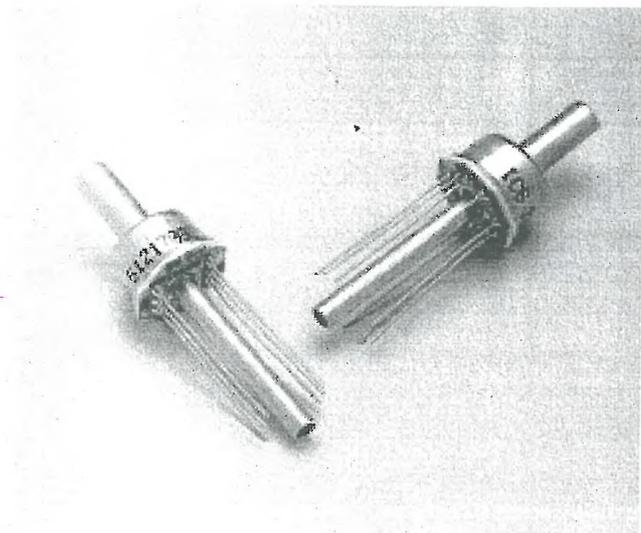
Données constructeur des éléments de la chaîne de mesure.

Models 32, 33 Medium Pressure



Board Mountable Pressure Sensor
 100 mV Output
 Differential Pressure
 Temperature Compensated

Medical Instrumentation
 HVAC
 Process Control
 Vacuum Measurement
 Air Flow Management



FEATURES

- ▶ TO-8 Package
- ▶ $\pm 0.1\%$ Non-linearity
- ▶ $\pm 1.0\%$ Temperature Performance
- ▶ 1.0% Interchangeable Span (provided by gain set resistor)
- ▶ Solid State Reliability
- ▶ Low Power

STANDARD RANGES

Range	psid
0 to 2	●
0 to 5	●
0 to 10	●
0 to 15	●
0 to 30	●
0 to 50	●
0 to 100	●
0 to 250	●

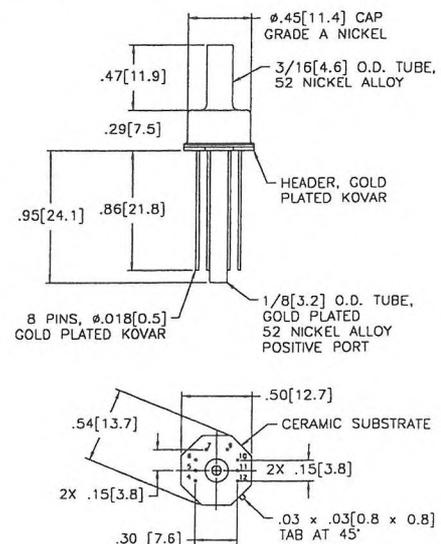
DESCRIPTION

The Models 32 and 33 are temperature compensated, piezoresistive silicon pressure sensors packaged in TO-8 configurations. They provide excellent performance and long-term stability.

Differential pressure ranges from 0-2 PSI to 0-250 PSI are available. Integral temperature compensation is provided over a range of 0-50°C using laser-trimmed resistors. An additional laser-trimmed resistor is included in the Model 33 to normalize pressure sensitivity variations by programming the gain of an external differential amplifier. This provides sensitivity interchangeability of $\pm 1\%$.

Please refer to the low pressure section for information on products with operating pressures less than 0-2 PSI. An uncompensated sensor (Model 30) is also available. For sensors in a dual-in-line package please refer to the Models 410, 1210 and 1220. Please contact the factory for additional information.

DIMENSIONS



DIMENSIONS ARE IN INCHES [mm]

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

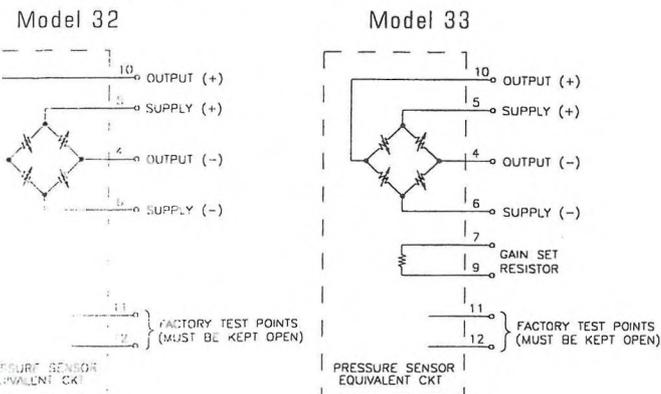
Supply Current: 1.5mA
 Ambient Temperature: 25°C (Unless otherwise specified)

PARAMETERS	GRADE A			GRADE B			UNITS	NOTES	
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX			
Full Scale Output Span	75	100	150	50	100	200	mV		
Full Scale Output Span (2 psi version)	30		60	30		100	mV		
Zero Pressure Output			1			2	±mV		
Linearity		0.05	0.10			0.25	±% Span	1	
Pressure Hysteresis		0.01	0.05			0.10	±% Span		
Input & Output Resistance	2500	4400	6000	2500	4400	6000	Ω		
Temperature Coefficient – Span		0.3	0.5			1.0	±% Span	2	
Temperature Coefficient – Zero		0.1	0.5			1.0	±% Span	2	
Thermal Hysteresis – Span		0.1			0.2		±% Span	2	
Thermal Hysteresis – Zero		0.1			0.2		±% Span	2	
Supply Current		1.5	2.0		1.5	2.0	mA	3	
Response Time		1.0			1.0		msec	4	
Output Noise		1.0			2.0		μV p-p	5	
Output Load Resistance	2			2			MΩ		
Isolation Resistance (50 VDC)	50			50			MΩ	6	
Pressure Overload			3X			3X	Rated	7	
Operating Temperature	-40°C to +125°C								
Storage Temperature	-55°C to +150°C								
Acceleration	50g Max								
Shock	1000g Peak for 0.5 ms								
Vibration	20g Peak at 10 to 2000 Hz								
Media	Non-Corrosive Gases								8
Weight	3 Grams								

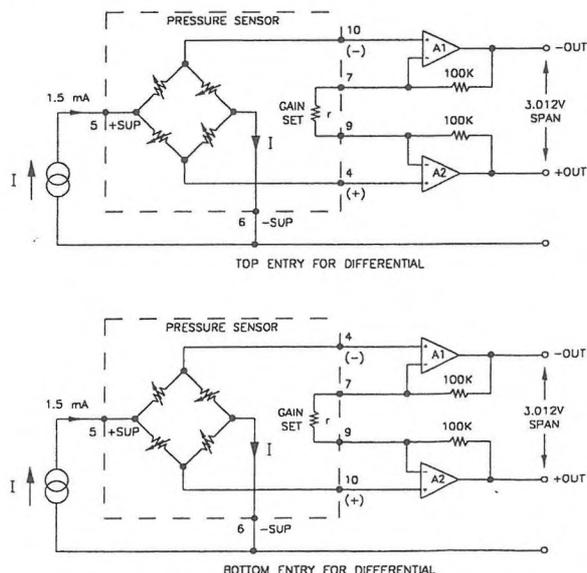
Notes:
 1. Best Fit Straight Line.
 2. Temperature range 0-50°C in reference to 25°C.
 3. Guarantees input/output ratiometricity.
 4. For a zero-to-full scale pressure step change.
 5. 10 Hz to 1 kHz

- Between case and sensing element.
- 3X not to exceed 500 psi on ranges: 0-10 psi to 0-200 psi, 20 psi for 2 psi and 5 psi versions.
- For top entry versions, wetted materials are silicon, gold, RTV, glass, nickel. For bottom entry versions, wetted materials are silicon, RTV, gold, and glass.

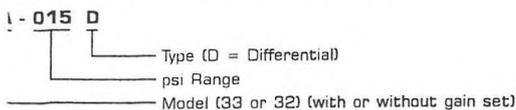
CONNECTIONS



APPLICATION SCHEMATIC



ORDERING INFORMATION

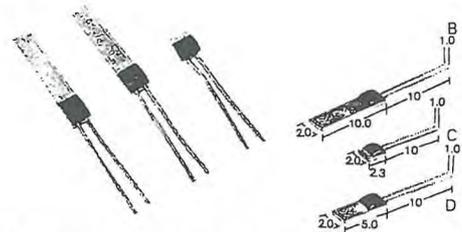


Capteurs de température

Sondes miniatures

Sondes platine

Correge



- ▶ Gamme complète de sondes platine, constituées d'un substrat en céramique sous une couche de platine, d'une protection en verre et de fils de sortie en nickel recouvert de platine.
- ▶ Applications: chauffage et climatisation, contrôle de la répartition d'énergie, technique automobile, électroménager, thermomètre autonome, etc.

Spécifications techniques

Dimensions et tolérances:

Température d'utilisation: -50°C à +600°C
 Longueur du substrat: ±0,2 mm
 Largeur du substrat: ±0,15 mm
 Epaisseur du substrat: 0,63 mm
 Epaisseur totale: 1,4 mm ±0,15 mm
 Diamètre des fils de sortie: 0,25 mm
 Longueur des fils de sortie: ±1 mm
 Distance entre les fils: ±0,2 mm
 Précision: - suffixe B: Classe B selon IEC 751 (DIN 43760)
 - suffixe A: Classe A = 1/2 Classe B
 - suffixe T: Classe 1/2 = 1/2 Classe B

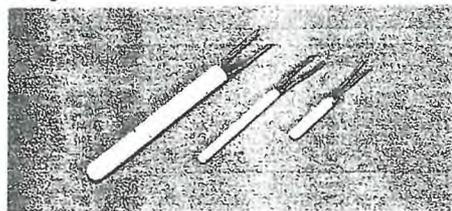
code commande	résistance nom. (Ω)	type de boîtier	temps de réponse	
			eau	air
181-1980	100 Ω	B	0,4 s	20 s
181-1996	100 Ω	B	0,4 s	20 s
293-8418	100 Ω	B	0,4 s	20 s
181-2012	100 Ω	C	0,3 s	15 s
181-2028	100 Ω	C	0,3 s	15 s
293-8430	100 Ω	C	0,3 s	15 s
181-2034	500 Ω	B	0,4 s	20 s
181-2040	500 Ω	B	0,4 s	20 s
181-2056	500 Ω	D	0,4 s	20 s
181-2062	500 Ω	D	0,4 s	20 s
181-2078	1000 Ω	B	0,4 s	20 s
181-2084	1000 Ω	B	0,4 s	20 s
293-8446	1000 Ω	B	0,4 s	20 s

U.D.V. = 1

réf. Correge	code commande	prix de l'U.D.V.		
		1-9	10-24	25+
Sondes Pt 100				
PTFB101B	181-1980	40,25	38,24	36,23
PTFB101A	181-1996	48,30	45,89	43,47
PTFB101T	293-8418	55,00	52,25	49,50
PTFC101B	181-2012	40,25	38,24	36,23
PTFC101A	181-2028	48,30	45,89	43,47
PTFC101T	293-8430	55,00	52,25	49,50
Sondes Pt 500				
PTFB501B	181-2034	40,25	38,24	36,23
PTFB501A	181-2040	48,30	45,89	43,47
PTFD501B	181-2056	40,25	38,24	36,23
PTFD501A	181-2062	48,30	45,89	43,47
Sondes Pt 1000				
PTFB102B	181-2078	40,25	38,24	36,23
PTFB102A	181-2084	48,30	45,89	43,47
PTFB102T	293-8446	55,00	52,25	49,50

Sondes platine Pt 100 cylindriques

Correge



- ▶ Gamme complète de sondes de haute précision pour mesures extrêmes dans l'industrie et les laboratoires.
- ▶ Sondes platine constituées d'un fil résistif bobiné inséré librement dans un support céramique cylindrique.
- ▶ Fils de sortie en platine pour les diamètres inférieurs à 2 mm et en platine palladium pour les autres diamètres.
- ▶ Classes de précision:
 - Classe A = 1/2 de classe B, R0 = 100,00 ± 0,06 Ω, R100 = 138,50 ± 0,13 Ω
 - Classe T = 1/2 de classe B, R0 = 100,00 ± 0,04 Ω, R100 = 138,50 ± 0,1 Ω
 - Classe 1/2 = 1/2 de classe B, R0 = 100,00 ± 0,02 Ω, R100 = 138,50 ± 0,05 Ω
 - Classe 1/10 = 1/10 de classe B, R0 = 100,00 ± 0,01 Ω, R100 = 138,50 ± 0,03 Ω
 - Duplex classe A = duplex 1/2 de classe B, R0 = 100,00 ± 0,06 Ω par circuit, R100 = 138,50 ± 0,13 Ω par circuit.

Spécifications techniques

Gamme de température: -200°C à +600°C (sauf 293-8519: -50°C à +75°C)
 Diamètre du support: ±0,015 mm
 Longueur du support: ±0,5 mm
 Longueur du fil de sortie: > 8 mm
 Diamètre du fil de sortie: 0,27 mm (support < 2 mm), 0,40 mm (support > 2 mm)
 Résistance de ligne: 0,0019 Ω/mm (support < 2 mm), 0,0008 Ω/mm (support > 2 mm)
 Auto-échauffement: < 0,002°C pour 1 mA

réf. Correge	code commande	classe de précision	Ø x L (mm)
PR1608A	293-8452	Classe A	1,6 x 8
PR1608T	293-8468	Classe T	1,6 x 8
PR1608S	293-8474	Classe 1/5	1,6 x 8
PR160810	293-8480	Classe 1/10	1,6 x 8
PR2825A	293-8496	Classe A	2,8 x 25
PR1415DA	293-8503	Duplex classe A	1,4 x 15
PTFA101AH	293-8519	Classe A	2,9 x 10

U.D.V. = 1

réf. Correge	code commande	prix de l'U.D.V.	
		1-9	10+
PR1608A	293-8452	180,00	171,00
PR1608T	293-8468	202,00	191,90
PR1608S	293-8474	245,00	232,75
PR160810	293-8480	325,00	308,75
PR2825A	293-8496	128,00	121,60
PR1415DA	293-8503	318,00	302,10
PTFA101AH	293-8519	112,50	106,88

Capteurs de température miniatures HEL 700

Honeywell



- ▶ Capteurs de température miniatures Pt 1000 encapsulés dans un matériau en céramique.
- ▶ Sortie par fils PTFE ou fibre de verre.
- ▶ Sortie linéaire.

PRIX EN BAISSÉ

Spécifications techniques

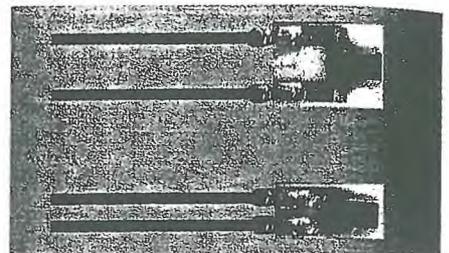
Réf.: HEL 705-U-2-12 HEL 707-U-2-12
 Gamme de température: -200°C à +260°C -75°C à +540°C
 Type de fils: PTFE fibre de verre
 Dimensions (mm): Ø 2,18 x 4,75 Ø 2,18 x 6,35
 Résistance à 0°C: 1000 Ω
 Coefficient de température: α = 0,00375 Ω/Ω/°C
 Courant de mesure max.: 2 mA
 Ecart de linéarité: ± 0,1% de l'échelle (-40°C à -125°C)
 ± 2% de l'échelle (-200°C à +540°C)
 Longueur des fils: 305 mm

U.D.V. = 1

réf. Honeywell	code commande	prix de l'U.D.V.	
		1-9	10+
HEL 705-U-2-12	293-8402	136,00	132,60
HEL 707-U-2-12	293-8654	146,00	142,35

Capteurs de température HEL 775

Honeywell



- ▶ Sondes Pt 1000 sur support céramique.
- ▶ Plage de mesure: -55°C à +150°C.
- ▶ Disponibles en 2 tailles.
- ▶ Excellente stabilité et interchangeabilité.

Spécifications techniques

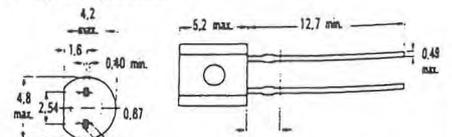
Résistance: 1000 ohms à 0°C
 Coefficient α = 0,00375 ohm/ohm/°C
 Interchangeabilité: ±1%
 Linéarité: ±15%
 Stabilité: 0,05°C sur 5 ans
 Temps de réponse: < 10 s (air à 3 m/s)
 Dimensions du substrat (mm): - HEL 775-AU1: 3,81 x 5,08 x 0,54
 - HEL 775-BU1: 2,54 x 5,08 x 0,54

U.D.V. = 1

réf. Honeywell	code commande	prix de l'U.D.V.	
		1-9	10+
HEL775AU1	334-2981	56,00	53,20
HEL775BU1	334-2997	44,60	42,37

Capteurs de température série KTY81

Philips Composants



- ▶ Capteurs à coefficient de température positif destinés aux diverses applications de contrôle et de mesure.
- ▶ Pour garantir l'erreur minimale en température, il est recommandé d'utiliser une intensité de 1 mA pour les températures supérieures à 100°C.

Spécifications techniques

Résistance à 25°C - 169-7324: 980 à 1020 Ω
 - 169-7346: 1960 à 2040 Ω
 Coefficient de température: 0,79%/K nom.
 I_c: 10 mA à 25°C; 2 mA à 150°C
 Boîtier: S0D-70
 Température d'utilisation: -55°C à +150°C

U.D.V. = 1

réf. Philips Composants	code commande	prix de l'U.D.V.	
		1-9	10+
KTY81-110	169-7324	18,00	16,20
KTY81-210	169-7346	18,00	16,20

Valable jusqu'au Prochain réglage Calibré

Des pastilles calendriers et des pastilles de prochaine opération sont disponibles en section 93

Commandes 0.803.034.034

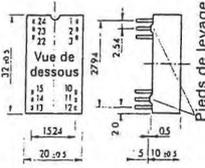
Capteurs de température	Capteurs de pression	Capteurs de niveau	Capteurs de forces	Capteurs de mouvement	Humidistances	Détecteurs de gaz	Codeurs	Capteurs de courant
-------------------------	----------------------	--------------------	--------------------	-----------------------	---------------	-------------------	---------	---------------------

Cap séri Analog
 Cap vrar
 Cap Sen
 Exc Lar
 Spécifi
 tension d' meur de c
 Températu Boîtier: TC
 U.D.V. réf. Analog
 AD590 AD590 AD590
 Cap de p National
 Ce c 0°C; 10 m
 Il ne préc
 Sort Etalk
 Spécific
 tension d'a Courant de Non linéarité Impédance Boîtier: TO
 U.D.V. réf. INS
 UM350;
 Capt séri Analog L
 Capt linéa
 Disp
 Déliv temp
 Appl niqu
 Spécific
 tension d'al Précision de
 Températur Niveau de s Boîtier: pla
 Cons 03.4.

Convertisseurs large plage d'entrée 2:1 série TED 2 W
Traco Power Products

PRIX EN BAISSA

2 ANS DE GARANTIE



Brochage			
N°	Sortie simple	Sortie double	Sortie simple
1-24	Entrée +	Sortie +	Sortie 1-
2-23	-	Sortie 2-	Sortie 1+
3-22	-	Sortie 2+	Sortie 1+

- ▶ Technologie CMS avec condensateur en céramique garantissant une haute fiabilité.
- ▶ Protection contre les courts-circuits de longue durée.
- ▶ Sortie régulée.
- ▶ Les modèles dont la sortie est double sont à sortie séparée.
- ▶ Boîtier métallique pour un bon blindage RFI.

Spécifications techniques

Précision de tension de sortie: $\pm 2\%$
Régulation - en ligne: $\pm 0,5\%$ max.
- en charge (10-90%): $\pm 1,0\%$ max.
Ondulation résiduelle (20 MHz bande passante): 60 mV crête-crête typ.
Tension d'isolement entrée/sortie: 500 V c.c.
Protection contre les courts-circuits: continue
Rendement: jusqu'à 78%
Matériau du boîtier: acier, plaqué nickel
Température d'utilisation: -25°C à $+75^{\circ}\text{C}$ (sans derating)
Température du boîtier: $+95^{\circ}\text{C}$ max.
MTBF (MIL-HDBK-217E): $> 1\ 000\ 000$ heures à $+25^{\circ}\text{C}$

code commande	sortie	
	U1/I1	U2/I2
Tension d'entrée 5 V c.c. (4,5 à 5,5 V)		
114-5514	5 V/400 mA	-
114-5520	12 V/160 mA	-
114-5542	12 V/80 mA	-12 V/80 mA
114-5558	15 V/65 mA	-15 V/65 mA
Tension d'entrée 12 V c.c. (9 à 18 V)		
114-5564	5 V/400 mA	-
114-5570	12 V/160 mA	-
114-5586	12 V/80 mA	-12 V/80 mA
114-5592	15 V/65 mA	-15 V/65 mA
Tension d'entrée 24 V c.c. (18 à 36 V)		
114-5609	5 V/400 mA	-
114-5615	12 V/160 mA	-
114-5621	12 V/80 mA	-12 V/80 mA
114-5637	15 V/65 mA	-15 V/65 mA

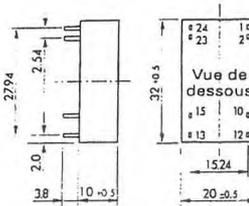
U.D.V. = 1

réf. Traco	code commande	prix de l'U.D.V.		
		1-9	10-24	25+
Tension d'entrée 5 V c.c. (4,5 à 5,5 V)				
TED 0511	▼ 114-5514	145,02	139,22	133,87
TED 0512	▼ 114-5520	145,02	140,38	135,78
TED 0521	▼ 114-5542	149,56	144,77	140,03
TED 0522	▼ 114-5558	149,56	144,77	140,03
Tension d'entrée 12 V c.c. (9 à 18 V)				
TED 1211	▼ 114-5564	145,02	140,38	135,78
TED 1212	▼ 114-5570	145,02	139,22	133,87
TED 1221	▼ 114-5586	149,56	144,77	140,03
TED 1222	▼ 114-5592	149,56	144,77	140,03
Tension d'entrée 24 V c.c. (18 à 36 V)				
TED 2411	▼ 114-5609	145,02	140,38	135,78
TED 2412	▼ 114-5615	145,02	140,38	135,78
TED 2421	▼ 114-5621	149,56	144,77	140,03
TED 2422	▼ 114-5637	149,56	144,77	140,03

Convertisseurs 2 W à isolement élevé série THI
Traco Power Products

PRIX EN BAISSA

2 ANS DE GARANTIE



Brochage			
N°	Sortie simple	Sortie double	Sortie simple
1	Entrée +	Entrée +	Sortie +
2	Entrée +	Entrée +	Sortie 1 +
10	N.C.	Commun	Entrée -
11	N.C.	Commun	Entrée -

- ▶ Série de convertisseurs en boîtier DIL plastique 24 broches complètement isolées, à simple ou double sortie régulée.
- ▶ Protection contre les courts-circuits en continu.

Conformes aux normes: EN 60950, EN 14003

Spécifications techniques

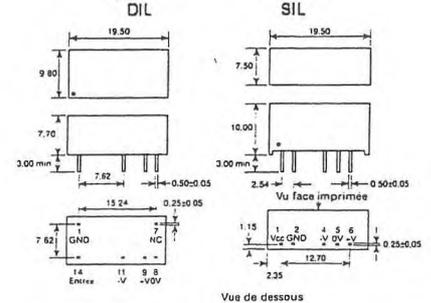
Précision de tension de sortie: $\pm 3\%$
Régulation - en ligne: $\pm 0,5\%$ max.
- en charge (10-90%): $\pm 1\%$ max.
Ondulation résiduelle (20 MHz): 50 mV crête-crête typ.
Tension d'isolement entrée/sortie: 3000 V c.a._{max}
Dimensions (mm): 32 x 20 x 15
Température d'utilisation: -25°C à $+70^{\circ}\text{C}$
Température du boîtier: $+95^{\circ}\text{C}$ max.

code commande	sortie	
	U1/I1	U2/I2
Tension d'entrée 5 V c.c. (4,5 à 5,5 V)		
282-4858	+5 V/0,4 A	-
282-4864	+12 V/0,16 A	-
282-4892	+12 V/0,08 A	-12 V/0,08 A
282-4909	+15 V/0,065 A	-15 V/0,065 A
Tension d'entrée 12 V c.c. (10,8 à 13,2 V)		
282-4915	+5 V/0,4 A	-
282-4959	+12 V/0,08 A	-12 V/0,08 A
282-4965	+15 V/0,065 A	-15 V/0,065 A
Tension d'entrée 24 V c.c. (21,6 à 26,4 V)		
282-4971	+5 V/0,4 A	-
282-5025	+12 V/0,080 A	-12 V/0,080 A
282-5031	+15 V/0,065 A	-15 V/0,065 A

U.D.V. = 1

réf. Traco Power Products	code commande	prix de l'U.D.V.		
		1-9	10+	
Tension d'entrée 5 V c.c. (4,5 à 5,5 V)				
THI0511	▼ 282-4858	190,34	184,25	
THI0512	▼ 282-4864	190,34	184,25	
THI0521	▼ 282-4892	199,41	193,03	
THI0522	▼ 282-4909	199,41	193,03	
Tension d'entrée 12 V c.c. (10,8 à 13,2 V)				
THI1211	▼ 282-4915	190,34	184,25	
THI1221	▼ 282-4959	199,41	193,03	
THI1222	▼ 282-4965	199,41	193,03	
Tension d'entrée 24 V c.c. (21,6 à 26,4 V)				
THI2411	▼ 282-4971	190,34	184,25	
THI2421	▼ 282-5025	199,41	193,03	
THI2422	▼ 282-5031	199,41	193,03	

Convertisseurs 2 W double sortie - série NMH
Newport Components



Brochage			
N°	Boîtiers DIL	N°	Boîtiers SIL
1	Masse	1	Entrée V
7	N.C.	2	Masse
8	0 V	4	Sortie -
9	Sortie +	5	0 V
11	Sortie -	6	Sortie +
14	Entrée V		

- ▶ Ces convertisseurs miniatures isolés à haut rendement, à sortie double, sont disponibles en boîtier SIL ou DIL.
- ▶ Déterminés à 100%.
- ▶ Bas profil.
- ▶ Puissance volumique 1,2 W/cm³.
- ▶ Toute la puissance de 2 W peut être tirée sur une seule sortie.

Spécifications techniques

Tolérance sur la tension d'entrée: $\pm 10\%$
Précision sur la tension de sortie: $\pm 5\%$
Régulation en charge (variation de 10 à 100%): $\pm 10\%$
Ondulation résiduelle et bruit: 150 mV crête-crête max.
Fréquence de découpage (à pleine charge): 75 kHz
Tension d'isolement entrée/sortie: 1000 V c.c.
Rendement: jusqu'à 80%
Température d'utilisation: 0°C à $+70^{\circ}\text{C}$

code commande	tension d'entrée	sortie	
		U1/I1	U2/I2
Boîtiers SIL			
596-826	5 V	5 V/200 mA	-5 V/200 mA
596-832	5 V	12 V/83 mA	-12 V/83 mA
596-848	5 V	15 V/67 mA	-15 V/67 mA
596-854	12 V	5 V/200 mA	-5 V/200 mA
596-860	12 V	12 V/83 mA	-12 V/83 mA
596-876	12 V	15 V/67 mA	-15 V/67 mA
Boîtiers DIL			
596-769	5 V	5 V/200 mA	-5 V/200 mA
596-775	5 V	12 V/83 mA	-12 V/83 mA
596-781	5 V	15 V/67 mA	-15 V/67 mA
596-797	12 V	5 V/200 mA	-5 V/200 mA
596-804	12 V	12 V/83 mA	-12 V/83 mA
596-810	12 V	15 V/67 mA	-15 V/67 mA

U.D.V. = 1

réf. Newport	code commande	prix de l'U.D.V.		
		1-9	10-24	25+
Boîtiers SIL				
NMH0505S	596-826	111,00	106,74	102,77
NMH0512S	596-832	111,00	106,74	102,77
NMH0515S	596-848	111,00	106,74	102,77
NMH1205S	596-854	111,00	106,74	102,77
NMH1212S	596-860	111,00	106,74	102,77
NMH1215S	596-876	111,00	106,74	102,77
Boîtiers DIL				
NMH0505D	596-769	111,00	106,74	102,77
NMH0512D	596-775	111,00	106,74	102,77
NMH0515D	596-781	111,00	106,74	102,77
NMH1205D	596-797	111,00	106,74	102,77
NMH1212D	596-804	111,00	106,74	102,77
NMH1215D	596-810	111,00	106,74	102,77

Résistances de précision série RC55

Welwyn

- ▶ Série de résistances de précision offrant une excellente stabilité dans le temps.
- ▶ Cette gamme est proposée sous deux tolérances de précision.

Homologation: CECC 40101-004

Spécifications techniques

Puissance dissipée: 0,25 W
Précision: ± 0,1%, 15 ppm ou ± 0,5%; 50 ppm
Dimensions (mm): L 7,2 x Ø 2,7

15 ppm - 0,1%

PRIX EN BAISSÉ

valeur	code commande										
51R1	165-9489	226R	165-9855	1K05	166-0209	4K87	166-0552	22K6	166-0912	75K0	166-1195
53R6	165-9502	237R	165-9861	1K10	166-0221	5K11	166-0568	23K7	166-0928	78K7	166-1202
56R2	165-9518	249R	165-9877	1K15	166-0237	5K36	166-0574	24K9	166-0940	82K5	166-1218
59R0	165-9524	261R	165-9883	1K21	166-0243	5K62	166-0580	26K1	166-0956	86K6	166-1230
61R9	165-9530	274R	165-9899	1K27	166-0259	5K90	166-0603	27K4	166-0962	90K9	166-1246
64R9	165-9546	287R	165-9906	1K33	166-0265	6K19	166-0619	28K7	166-0978	95K3	166-1252
68R1	165-9568	301R	165-9912	1K40	166-0271	6K49	166-0625	30K1	166-0984	100K	166-1268
71R5	165-9574	316R	165-9928	1K47	166-0287	6K81	166-0631	31K6	166-0990	105K	166-1274
75R0	165-9580	332R	165-9934	1K54	166-0293	7K15	166-0647	33K2	166-1016	110K	166-1280
78R7	165-9596	348R	165-9940	1K62	166-0300	7K50	166-0669	34K8	166-1022	115K	166-1296
82R5	165-9603	365R	165-9956	1K69	166-0316	7K87	166-0675	36K5	166-1038	121K	166-1303
86R6	165-9625	383R	165-9962	1K78	166-0322	8K25	166-0681	38K3	166-1044	127K	166-1319
90R9	165-9631	402R	165-9978	1K87	166-0338	8K66	166-0697	40K2	166-1050	133K	166-1325
95R3	165-9647	422R	165-9984	1K96	166-0344	9K09	166-0704	42K2	166-1066	140K	166-1331
100R	165-9653	442R	166-0007	2K05	166-0350	9K53	166-0726	44K2	166-1072	147K	166-1347
105R	165-9669	464R	166-0013	2K15	166-0366	10K0	166-0732	46K4	166-1088	154K	166-1353
110R	165-9675	487R	166-0029	2K26	166-0388	10K5	166-0748	48K7	166-1094	162K	166-1369
115R	165-9681	511R	166-0035	2K37	166-0394	11K0	166-0754	51K1	166-1101	169K	166-1375
121R	165-9697	536R	166-0041	2K49	166-0401	11K5	166-0760	53K6	166-1117	178K	166-1397
127R	165-9704	562R	166-0057	2K61	166-0417	12K1	166-0776	56K2	166-1123	187K	166-1404
133R	165-9710	590R	166-0063	2K74	166-0423	12K7	166-0782	59K0	166-1139	196K	166-1410
140R	165-9726	619R	166-0079	2K87	166-0445	13K3	166-0798	61K9	166-1145	205K	166-1426
147R	165-9732	649R	166-0085	3K01	166-0451	14K0	166-0805	64K9	166-1151	215K	166-1432
150R	165-9748	681R	166-0108	3K16	166-0467	14K7	166-0811	68K1	166-1173	226K	166-1454
154R	165-9754	715R	166-0114	3K32	166-0473	15K4	166-0827	71K5	166-1189	237K	166-1460
162R	165-9760	750R	166-0120	3K48	166-0489	16K2	166-0833				
169R	165-9782	787R	166-0136	3K65	166-0495	16K9	166-0849				
178R	165-9798	825R	166-0142	3K83	166-0502	17K8	166-0855				
187R	165-9805	866R	166-0164	4K02	166-0518	18K7	166-0861				
196R	165-9811	909R	166-0170	4K22	166-0524	19K6	166-0883				
205R	165-9827	953R	166-0186	4K42	166-0530	20K5	166-0899				
215R	165-9849	1K00	166-0192	4K64	166-0546	21K5	166-0906				

U.D.V. = 10

code commande	prix de l'U.D.V.		
	1-9	10-19	20+
Ci-dessus	59,40	53,46	47,52

50 ppm - 0,5%

PRIX EN BAISSÉ

valeur	code commande										
26R1	166-1476	162R	166-1864	909R	166-2277	5K11	166-2665	27K4	166-3078	105K	166-3387
27R4	166-1482	169R	166-1870	953R	166-2283	5K36	166-2687	28K7	166-3084	110K	166-3393
28R7	166-1498	178R	166-1892	1K00	166-2299	5K62	166-2693	30K1	166-3090	115K	166-3400
30R1	166-1511	187R	166-1909	1K05	166-2306	5K9	166-2700	31K6	166-3107	121K	166-3416
31R6	166-1527	196R	166-1915	1K10	166-2312	6K19	166-2716	33K2	166-3113	127K	166-3422
33R2	166-1533	205R	166-1921	1K15	166-2328	6K49	166-2722	34K8	166-3129	133K	166-3438
34R8	166-1549	215R	166-1937	1K21	166-2334	6K81	166-2744	36K5	166-3135	140K	166-3444
36R5	166-1555	226R	166-1959	1K27	166-2340	7K15	166-2750	38K3	166-3141	147K	166-3450
38R3	166-1561	237R	166-1965	1K33	166-2356	7K5	166-2766	40K2	166-3157	154K	166-3472
40R2	166-1577	249R	166-1971	1K40	166-2362	7K87	166-2772	42K2	166-3163	162K	166-3488
42R2	166-1583	261R	166-1987	1K47	166-2378	8K25	166-2788	44K2	166-3179	169K	166-3494
44R2	166-1599	274R	166-1993	1K54	166-2384	8K66	166-2794	46K4	166-3191	178K	166-3501
46R4	166-1606	287R	166-2003	1K62	166-2407	9K09	166-2801	48K7	166-3208	187K	166-3517
48R7	166-1612	301R	166-2025	1K69	166-2413	9K53	166-2817	51K1	166-3214	196K	166-3539
51R1	166-1628	316R	166-2031	1K78	166-2429	10K0	166-2823	53K6	166-3220	205K	166-3545
53R6	166-1634	332R	166-2047	1K87	166-2435	10K5	166-2839	56K2	166-3236	210K	166-3551
56R2	166-1640	348R	166-2053	1K96	166-2441	11K0	166-2845	59K0	166-3258	215K	166-3567
59R0	166-1656	365R	166-2069	2K05	166-2463	11K5	166-2851	61K9	166-3264	226K	166-3573
61R9	166-1678	383R	166-2075	2K15	166-2479	12K1	166-2867	64K9	166-3270	237K	166-3589
64R9	166-1684	402R	166-2081	2K26	166-2485	12K7	166-2873	68K1	166-3286	249K	166-3595
68R1	166-1690	422R	166-2097	2K37	166-2491	13K3	166-2889	71K5	166-3292	261K	166-3602
71R5	166-1707	442R	166-2104	2K49	166-2508	14K0	166-2902	75K0	166-3315	274K	166-3618
75R0	166-1713	464R	166-2110	2K61	166-2520	14K7	166-2918	78K7	166-3321	287K	166-3624
78R7	166-1735	487R	166-2126	2K74	166-2536	15K4	166-2924	82K5	166-3337	301K	166-3630
82R5	166-1741	511R	166-2132	2K87	166-2542	16K2	166-2930	86K6	166-3343	316K	166-3646
86R6	166-1757	536R	166-2148	3K01	166-2558	16K5	166-2946	90K9	166-3359	332K	166-3652
90R9	166-1763	562R	166-2154	3K16	166-2564	16K9	166-2968	95K3	166-3365	348K	166-3668
95R3	166-1779	590R	166-2160	3K32	166-2570	17K8	166-2974	100K	166-3371		
100R	166-1785	619R	166-2182	3K48	166-2586	18K7	166-2980				
105R	166-1791	649R	166-2198	3K65	166-2592	19K6	166-2996				
110R	166-1808	681R	166-2205	3K83	166-2609	20K5	166-3006				
121R	166-1814	715R	166-2211	4K02	166-2615	21K5	166-3012				
127R	166-1820	750R	166-2227	4K22	166-2621	22K6	166-3034				
133R	166-1836	787R	166-2249	4K42	166-2637	23K7	166-3040				
140R	166-1842	825R	166-2255	4K64	166-2643	24K9	166-3056				
154R	166-1858	866R	166-2261	4K87	166-2659	26K1	166-3062				

U.D.V. = 10

code commande	prix de l'U.D.V.		
	1-9	10-19	20+
Ci-dessus	19,60	17,64	15,68

ANNEXE 4

Norme DIN 43760.

devient :

SONDE DE PLATINE

Résistance en fonction de la température - d'après la Norme DIN 43760

l, ne dépend que de la
ndépendant de l'émissi-
ype de pyromètre.

°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω
-220	10,41	+50	119,40	+320	219,13	+590	310,43
210	14,36	60	123,24	330	222,66	+600	313,65
-200	18,53	70	127,07	340	226,18	610	316,86
190	22,78	80	130,89	+350	229,69	620	320,05
180	27,05	90	134,70	360	233,19	630	323,24
170	31,28	+100	138,50	370	236,67	640	326,41
160	35,48	110	142,28	380	240,15	+650	329,57
150	39,65	120	146,06	390	243,61	660	332,72
140	43,80	130	149,82	+400	247,06	670	335,86
130	47,93	140	153,57	410	250,50	680	338,99
120	52,04	+150	157,32	420	253,93	690	342,10
110	56,13	160	161,05	430	257,34	+700	345,21
-100	60,20	170	164,76	440	260,75	710	348,30
90	64,25	180	168,47	+450	264,14	720	351,38
80	68,28	190	172,16	460	267,52	730	354,45
70	72,29	+200	175,84	470	270,89	740	357,51
60	76,28	210	179,51	480	274,25	+750	360,55
-50	80,25	220	183,17	490	277,60	760	363,59
40	84,21	230	186,82	+500	280,93	770	366,61
30	88,17	240	190,46	510	284,25	780	369,62
20	92,13	+250	194,08	520	287,57	790	372,62
-10	96,07	260	197,70	530	290,87	+800	375,61
+ 0	100,00	270	201,30	540	294,16	810	378,59
+10	103,90	280	204,88	+550	297,43	820	381,55
20	107,79	290	208,46	560	300,70	830	384,50
30	111,67	+300	212,03	570	303,95	840	387,45
40	115,54	310	215,58	580	307,20	850	390,38

), *Manual on the use*
lphie, A.S.T.M., 1974.
Measurement in engineer-

transfer, New-York,

Conditions Radio, 1975.

Thermometer for absolute
1974, p. 1499.

Measurement in noise thermometry".

Transducers and other trans-

Instrument, 21, 1988, p.425
Measurement in circular ducts".

Temperature sensors". I.S.A.

Heat leaks in platinum
p. 361.

Temperature indication
p. 316.

Standards". *Rev. Sci. Instr-*

struments. *Méthodes de me-*

asurement of temperature

Measurement by radiation

Journal B.N.M., N° 20,

Measurement". *Rev.*

Journal State Electronics,

Ecarts admissibles par rapport aux valeurs nominales

T(°C)	-220	-200	-100	0	100	200	300	400	500	600	700	800	850
Ecarts													
en ±Ω	0,7	0,5	0,3	0,1	0,25	0,45	0,65	0,85	1,0	1,2	1,35	1,45	1,5
en ±°C	1,8	1,2	0,7	0,3	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,1

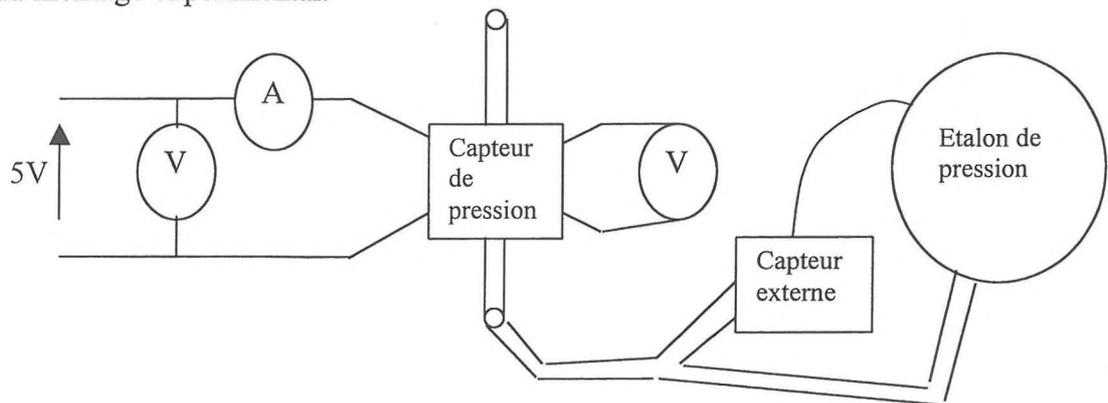
ANNEXE 5

Détermination du jeu de résistances selon la méthode WIND.

Détermination de la valeur des jeux de résistances pour la mesure de pression.

Cette opération a été réalisée en se référant à la méthode WIND, qui utilise le même type de capteur de pression différentielle. Les valeurs de R10, R11, R12 et R13 dépendent directement de la résistance interne du capteur de pression. Celle-ci est présente dans la notice constructeur, mais beaucoup trop vague. On a donc effectué 2 séries de mesures sur chaque capteur de pression, la première à $\Delta p=0$, la seconde pour une dépression de $-1\text{psi} = -70\text{cmCE}$, imposée par l'étalon de pression DRUCK configuré en mesure externe. Notre capteur a un intervalle de travail de -2 à 2 psi, mais le capteur externe de l'étalon est limité à -1 psi, on effectue donc la mesure pour cette différence de pressions. On fait tout cela en simulant une alimentation de 5V aux bornes du capteur avec un générateur de tension continue stabilisé. Ensuite grâce à quelques calculs simples, on a pu déterminer la valeur des résistances.

Schéma du montage expérimental.



1 : mesures et calculs à $\Delta p=0$.

Grâce au montage ci-dessus, on mesure les 3 grandeur suivantes :

Capteur model 032A-002D
N°1262-0070

$V_{\text{lim},0}=5.05\text{V}$
 $I_{\text{lim},0}=1.236\text{mA}$
 $V_{s,0}=1.0\text{mV}$

Capteur model 032A-002D
N°1262-0081

$V_{\text{lim},0}=5.00\text{V}$
 $I_{\text{lim},0}=1.275\text{mA}$
 $V_{s,0}=1.0\text{mV}$

On peut déjà en déduire la résistance du capteur :

$$R_{cp} = \frac{V_{\text{lim},0}}{I_{\text{lim},0}}$$

Grâce à plusieurs mesures, on trouve une résistance moyenne :
 $R_{cp}=4100\Omega$

$R_{cp}=3900\Omega$

2 : mesures à $\Delta p=-1\text{psi}$:

Dans ce cas-ci, on a donc simplement mesuré la tension de sortie du capteur, et on trouve :

$V_s=-14,6\text{V}$

$V_s=-14,9\text{V}$

On calcule maintenant la tension de sortie théorique du capteur pour un $\Delta p = -2$ psi.

$$V_{S,-2\text{psi}} = -2 \frac{(V_S - V_{S0})}{-1}$$

$$V_{S,-2\text{psi}} = -31,2\text{mV}$$

$$V_{S,-2\text{psi}} = -31,8\text{mV}$$

On est en présence d'un capteur dont la tension de sortie est proportionnelle à la tension d'entrée or si on choisit sur notre centrale de mesure le calibre $[-15 ; 15\text{mV}]$, on peut en déduire le courant d'alimentation maximum pour une pleine échelle de mesure :

$$I_{\text{alim},-2\text{psi}} = I_{\text{alim},0} \frac{-15 \cdot 10^{-3}}{V_{S,-2\text{psi}}}$$

$$I_{\text{alim},-2\text{psi}} = 0,594\text{mA}$$

$$I_{\text{alim},-2\text{psi}} = 0,601\text{mA}$$

On en déduit la résistance équivalente Req_{tot} , qui est la somme de celle du capteur avec celle du jeu de résistances Req_R .

$$Req_{\text{tot}} = \frac{V_{S,-2\text{psi}}}{I_{\text{alim},-2\text{psi}}}$$

$$Req_{\text{tot}} = 8498\Omega$$

$$Req_{\text{tot}} = 8319\Omega$$

D'où :

$$Req_R = 4398\Omega$$

$$Req_R = 4419\Omega$$

On en déduit la valeur des résistances prises parmi celles que nous propose le constructeur (cf. annexe) :

$$Req_R = R_{10} + R_{13} + \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} \right)$$

$$R_{10} = 3010\Omega$$

$$R_{10} = 1690\Omega$$

$$R_{11} = 3480\Omega$$

$$R_{11} = 3480\Omega$$

$$R_{12} = 2150\Omega$$

$$R_{12} = 2150\Omega$$

$$R_{13} = 59,0\Omega$$

$$R_{13} = 1400\Omega$$

Capteur model 032A-002D
1262-0070.

Capteur model 032A-002D
1262-0081.

Toutes ces résistances sont des résistances de précision à 0,1% d'erreur et variant de 15 ppm/°C.

ANNEXE 6

Programme d'acquisition de mesure d'infiltration.

:{21X}

*Table 1 Program

01: 1 Execution Interval (seconds)

1: Volt (Diff) (P2)

1: 1 Reps
2: 2 15 mV Slow Range
3: 1 DIFF Channel
4: 1 Loc [pression]
5: 1.0 Mult
6: 0.0 Offset

2: Batt Voltage (P10)

1: 2 Loc [batterie]

3: 3W Half Bridge (P7)

1: 1 Reps
2: 3 50 mV Slow Range
3: 3 SE Channel
4: 1 Excite all reps w/Exchan 1
5: 4200 mV Excitation
6: 3 Loc [Upt100]
7: 100 Mult
8: 0.0 Offset

4: Temperature RTD (P16)

1: 1 Reps
2: 3 R/R0 Loc [Upt100]
3: 4 Loc [Temper]
4: 1 Mult
5: 0.0 Offset

5: Do (P86)

1: 10 Set Output Flag High

6: Real Time (P77)

1: 11 Hour/Minute,Seconds (midnight = 0000)

7: Sample (P70)

1: 1 Reps
2: 1 Loc [pression]

8: Sample (P70)

1: 1 Reps
2: 2 Loc [batterie]

9: Sample (P70)

1: 1 Reps
2: 3 Loc [Upt100]

10: Sample (P70)
1: 1 Reps
2: 4 Loc [Temper]

11: Z=Z+1 (P32)
1: 8 Z Loc [tpscum]

12: Sample (P70)
1: 1 Reps
2: 8 Loc [tpscum]

*Table 2 Program
02: 0.0000 Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

ANNEXE 7

Programme d'acquisition pour l'étalonnage.

:{21X}

:

*Table 1 Program

01: 10 Execution Interval (seconds)

1: Volt (Diff) (P2)

1: 1 Reps
2: 2 15 mV Slow Range
3: 1 DIFF Channel
4: 1 Loc [pression]
5: 1.0 Mult
6: 0.0 Offset

2: Batt Voltage (P10)

1: 2 Loc [batterie]

3: Volt (Diff) (P2)

1: 1 Reps
2: 3 50 mV Slow Range
3: 3 DIFF Channel
4: 5 Loc [Tref]
5: 1.0 Mult
6: 0.0 Offset

4: 3W Half Bridge (P7)

1: 1 Reps
2: 3 50 mV Slow Range
3: 3 SE Channel
4: 1 Excite all reps w/Exchan 1
5: 4200 mV Excitation
6: 3 Loc [Upt100]
7: 100 Mult
8: 0.0 Offset

5: Temperature RTD (P16)

1: 1 Reps
2: 3 R/R0 Loc [Upt100]
3: 4 Loc [Temper]
4: 1 Mult
5: 0.0 Offset

6: Do (P86)

1: 10 Set Output Flag High

7: Real Time (P77)

1: 11 Hour/Minute,Seconds (midnight = 0000)

8: Sample (P70)

1: 1 Reps
2: 1 Loc [pression]

ETALTRIM.CSI, Table 1

9: Sample (P70)

1: 1 Reps
2: 2 Loc [batterie]

10: Sample (P70)

1: 1 Reps
2: 5 Loc [Tref]

11: Sample (P70)

1: 1 Reps
2: 3 Loc [Upt100]

12: Sample (P70)

1: 1 Reps
2: 4 Loc [Temper]

13: Z=Z+1 (P32)

1: 10 Z Loc [tpscum1]

14: Z=X*F (P37)

1: 10 X Loc [tpscum1]
2: 10 F
3: 8 Z Loc [tpscum]

15: Sample (P70)

1: 1 Reps
2: 8 Loc [tpscum]

*Table 2 Program

02: 0.0000 Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program