





00008280

~~00008280~~

**PREMIER COURS NATIONAL POST-GRADUE  
SUR L'IRRIGATION, LE DRAINAGE  
ET LA GESTION DES RESSOURCES HYDRIQUES**

**COORDINATION:**

**INSTITUT INTERAMERICAIN DE  
COOPERATION POUR L'AGRICULTURE (IICA)  
FACULTE D'AGRONOMIE ET  
MEDECINE VETERINAIRE (FAMV)**

**SOUTIEN FINANCIER:**

**AGENCE DE DEVELOPPEMENT INTERNATIONAL (USAID)  
AGENCE CANADIENNE POUR LE DEVELOPPEMENT INTERNATIONAL (ACDI)  
INSTITUT INTERAMERICAIN DE COOPERATION POUR L'AGRICULTURE (IICA)  
MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DES RESSOURCES NATURELLES ET  
DEVELOPPEMENT RURAL (MARNDR)  
FACULTE D'AGRONOMIE ET MEDECINE VETERINAIRE (FAMV)**

**TEXTE :** DETERMINATION DE L'HUMIDITE DU SOL, PROCEDURE ET CALCUL  
**DACTYLOGRAPHIE :** LAURENCE JOACHIM ET JULIETTE MOREL  
**DESSINS :** JEAN-ROBERT MOREL  
**ORIGINAL :** ESPAGNOL  
**TRADUCTION :** HUMBERTO PIZARRO-JULIETTE MOREL  
**REVISION :**  
**TRADUCTION :** ARIEL AZAEL



# DETERMINATION DE L'HUMIDITE DU SOL- PROCEDURES-EQUIPEMENT ET CALCULS

## TABLE DE MATIERES

	Page
Table de matières	i
Liste de figures	ii
Liste de tableaux	iv
Détermination de l'humidité du sol-Procédure-Equipement et calcul	1
2.1 Description des méthodes	2
2.1.1 Méthode gravimétrique	2
2.1.2 Tensiomètres	2
2.1.3 Tensiomètre ocmétique	7
2.1.4 Blocs de résistance	9
2.1.5 Méthodes radioactives	14
2.1.6 Le transfert de chaleur	24
2.1.7 Psychomètres	25
2.2 Expression de l'eau dans le sol	43
2.2.1 Exprimée en pourcentage sur la base du sol sec	43
2.2.2 La teneur en eau exprimée en volume	43
2.2.3 Hauteur en lame d'eau	44
2.2.4 Lamme en hauteur d'irrigation	46
2.2.5 Exemples conceptuels	47
2.3 L'Hydraulique de l'eau dans le sol	49
2.4 Exemples conceptuels	51
BIBLIOGRAPHIE	57

## LISTE DE FIGURES

Figure	Page	
II.1	Tensiomètre commercial pour la Gestion de l'irrigation	3
II.2	Schéma des composantes d'un tensiomètre sensible pour les travaux de recherche	5
II.3	Schéma du tensiomètre osmotique	6
II.4	Courbe d'étalonnage du tensiomètre osmotique	8
II.5	Blocs de gypse couramment utilisés pour déterminer la teneur en eau du sol	10
II.6	Appareil de jaugeage portable pour être utilisé avec les blocs de gypse	11
II.7	Courbes d'étalonnage typique de blocs de résistance en fonction du pourcentage d'humidité	12
II.8	Etalonnage de différents types de blocs de résistance, exprimé en termes du potentiel matriciel	13
II.9	Schéma de la mise en place des tubes d'accès, prise d'échantillons du sol et lecture par la sonde à neutrons	16
II.10	Courbe d'étalonnage relative de la sonde à neutrons dans un oxysol	18
II.11	Etalonnage d'un humidimètre Nucléaire Chicago P-19 dans un sol sableux (Millar et al) 1971	19
II.12	Etalonnage absolue d'un humidimètre Troxler dans un sol limoneux à différentes densités apparentes (Mc Henry et Gill 1967)	20
II.13	Etalonnage relative d'une sonde à neutrons réalisé à 0,76m de profondeur pour différents types de sols Taylor et al 1861	20
II.13a	Courbe d'étalonnage d'une sonde à neutrons dans un sol caucaniques. On a employé deux types de tubes d'accès	21
II.14	Schéma de l'équipement de rayonnement gamme pour les études sur le terrain	22
II.15	Profils de Psychromètres Spanner (Effet Peltier) A et de Richards et Ogata B.	27
II.16	Support pour maintenir les fils de Chromel et Constantan en contact étroit et fixé les thermo couples	

II. 17	Circuit pour la soudure par le biais de la décharge d'un condensateur à l'aide d'un courant continu	29
II. 18a	Circuit pour souder par le biais de la décharge d'un condensateur à l'aide d'un courant alternatif rectifié	31
II.18b	Circuit pour la rectification du courant alternatif d'une intensité plus grande	31
II.19	Psychromètre pour déterminer le potentiel hydrique dans les échantillons des végétaux ou des sols (Millar 1971)	32
II.20	Psychromètre pour déterminer in situ le potentiel hydrique dans le sol	32
II.21	Séquence de la construction et montage d'un psychromètre du type peltier (Millar 1971)	34
II.22	Force électromotrice en fonction du temps pour psychromètre Spanner, type peltier, employé en échantillons de feuilles d'orge	37
II.23	Étalonnage de psychromètres Spanner avec solutions de KCL (Millar 1971)	38
II.24	Courbe d'étalonnage d'un psychromètre de Peltier à 15 <sup>0</sup> , 25 <sup>0</sup> , et 35 <sup>0</sup> Celcius	39
II.25	Circuit électrique pour appliquer le courant froid à psychromètres de thermocouples	40
II.26	Schéma qui montre les termes du théorème de Bernoulli appliqué à l'écoulement de l'eau dans les tuyaux	52
II.27	Schéma qui montre les composantes de la charge hydraulique dans le cas du piezomètre et du tensiomètre	52
II.28	Schéma d'un tensiomètre de recherche	53

## LISTE DE TABLEAUX

TABLEAU		PAGE
II.1	Potentiel hydrique des solutions de NaCl	36



## DETERMINATION DE L'HUMIDITE DU SOL PROCEDURES- EQUIPEMENT ET CALCULS

Il existe plusieurs méthodes pour connaître la quantité d'eau présente dans le sol. Le choix dépend de la disponibilité de l'équipement et de la précision recherchée.

On trouve des méthodes de mesure directes et indirectes

Méthodes directes:

- a- Gravimétrie
- b- Tensiomètres (commercial et de recherche)

Méthodes Indirectes:

- c- Tensiomètres osmotiques
- d- Blocs de résistance
- e- Radioactivité (détection des neutrons, atténuation des rayons gamma)
- f- Transmission de la chaleur
- g- Psychromètres (termocouples, thermistors)

D'après le paramètre que l'on mesure, les méthodes de détermination peuvent être groupées comme suit:

- a- Méthode gravimétrique
- b- Méthode de l'atténuation des rayons Gamma
- c- Méthode de la dispersion des neutrons
- d- Transmission de la chaleur

Mesure du potentiel matriciel (Succion) au potentiel de l'humidité.

- a- La membrane à pression
- b- Tensiomètres
- c- Tensiomètre osmotique
- d- Psychromètres
- e- Point de congélation

## 2.1 Description des méthodes

### 2.1.1 Méthode Gravimétrique

Elle consiste à désécher l'échantillon du sol à 105°C pendant 24 heures. La perte de poids après séchage est égale à la teneur d'eau du sol. Les valeurs obtenues peuvent être exprimées en pourcentage par rapport au poids de l'échantillon sec ou humide. La méthode est précise mais elle est laborieuse qui demande du temps ainsi que la prise de plusieurs échantillons.

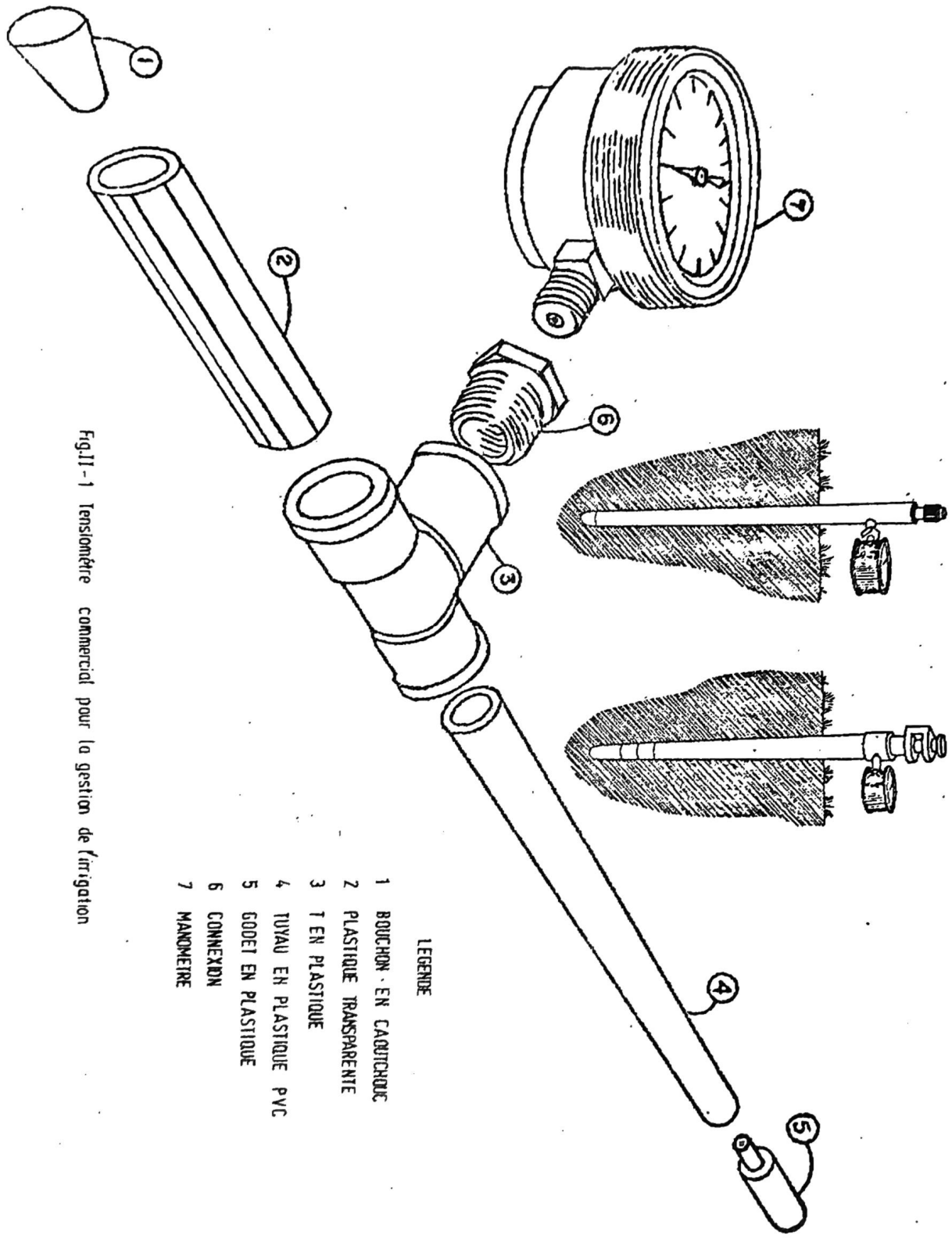
### 2.1.2 Tensiomètres

Ils mesurent la tension à laquelle l'eau est retenue par le sol. Ils sont applicables dans l'intervalle de tension 0 à 700 cm d'eau. Pour des tensions plus fortes les gaz dissous dans l'eau, pénètrent dans la capsule poreuse brisant la continuité de la colonne d'eau. Cet appareil mesure seulement une partie de l'intervalle de tension correspondant à l'humidité utilisable du sol spécialement dans les sols argileux. A l'heure actuelle il est possible de mesurer des tensions entre 0 et 15 bars avec le tensiomètre osmotique que l'on décrira après.

Sur le marché, on trouve des tensiomètres avec des vacuomètres gradués en centibars qui sont très utiles pour la programmation de l'irrigation des cultures, mais il ne sont pas précis lorsque les charges hydrauliques sont de l'ordre de un millibar (figure II.1)

Pour la recherche, on a besoin de tensiomètres qui apportent une meilleure précision que celle donnée par les tensiomètres commerciaux, dans ce cas, il faut les construire. Ces appareils sont très utiles lorsqu'il s'agit d'étudier un phénomène où le mouvement de l'eau joue un rôle important comme c'est le cas du bilan hydrique pour connaître l'écoulement d'eau d'entrée et de sortie de la zone de racines.

Un tensiomètre sensible consiste en une capsule poreuse, un système d'amplification (Réduction du diamètre du tuyau) et un mano



- 1 BOUCHON EN CAOUTCHOUC
- 2 PLASTIQUE TRANSPARENTE
- 3 T EN PLASTIQUE
- 4 TUYAU EN PLASTIQUE PVC
- 5 GODET EN PLASTIQUE
- 6 CONNEXION
- 7 MANOMETRE

LEGENDE

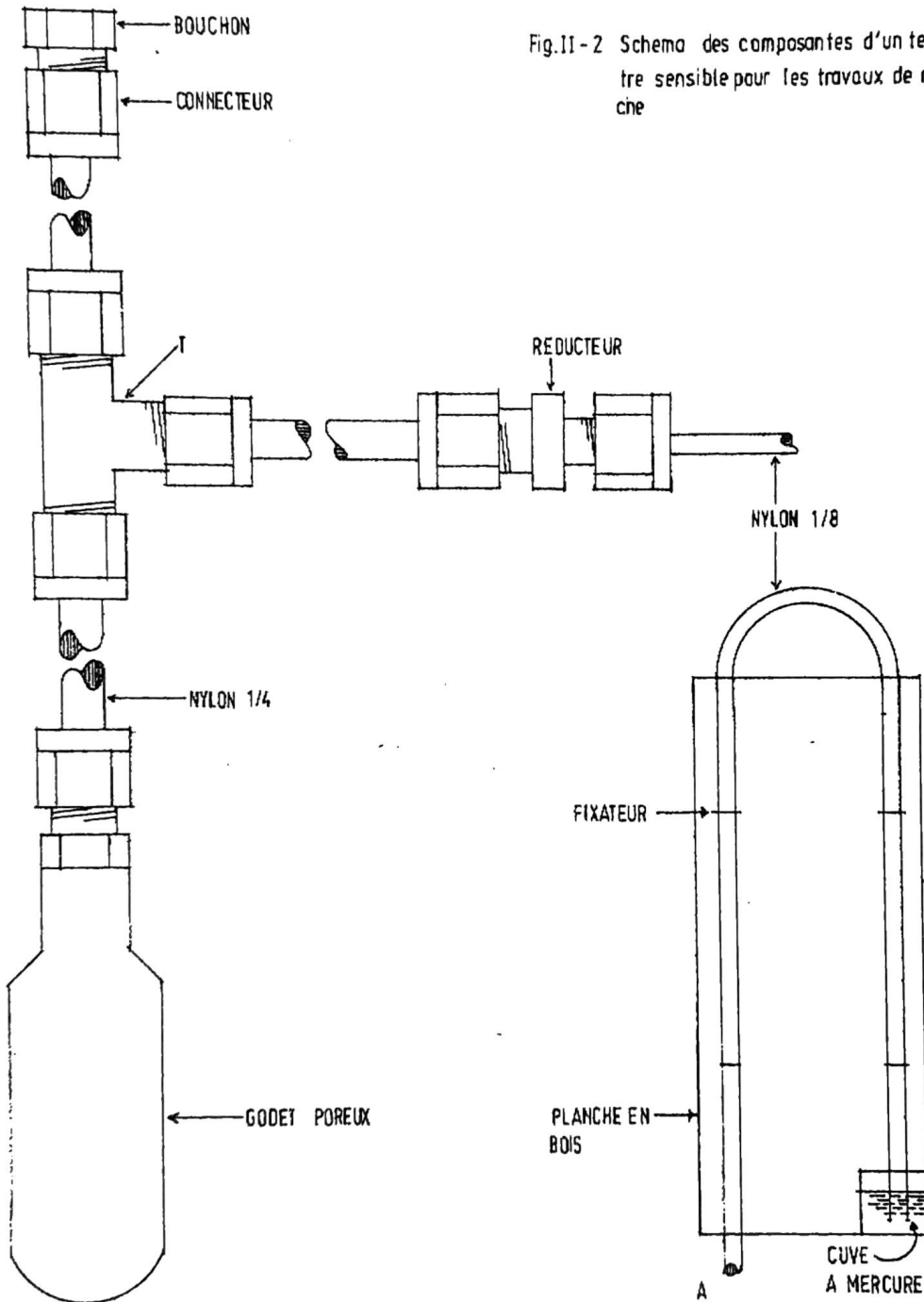
FigII - 1 Tensionnètre commercial pour la gestion de l'irrigation

mètre.

La capsule poreuse est liée à la surface du sol par le biais d'un tuyau de nylon ( $d=0,25$  de pouce), avec un joint T, lequel doit rester de  $0,10$  m à  $0,15$  m sous la surface du sol. Du joint T sort de l'extérieur de la surface un tuyau d'une longueur de  $0,15$  m, à travers ce dernier on fait la chasse de l'air. À l'autre extrémité du joint T, on a un tuyau de nylon ( $d=0,25$  pouces) de  $0,10$  m de longueur à l'extrémité duquel on place un réducteur pour passer du diamètre  $0,25$  à  $0,125$  de pouce. Cette dernière partie se joint au récipient de mercure.

L'avantage de ce type d'appareil est qu'il facilite la chasse de l'air à travers du tuyau de  $0,125$  pouce., ce type de tensiomètre lorsqu'il est utilisé sur le terrain exige la chasse de l'air tous les sept jours. Cette opération est réalisée par le tuyau de nylon très fin, lequel reste dans l'appareil verticalement entre l'extrémité intérieure de la capsule poreuse et l'extrémité du tuyau de  $0,125$  de pouce sur la superficie. Lorsqu'on réalise la chasse de l'air, il faut s'assurer de l'étanchéité entre le tuyau de  $0,125$  pouce et le tuyau fin. L'eau utilisée pour la chasse (eau bouillie pour éviter l'entrée d'air) est appliquée dans l'appareil à l'aide d'une seringue hypodermique liée au tuyau fin de telle manière que lors de l'introduction de l'eau à pression dans le fond de la capsule l'eau qui déplace les bulles d'air crée une turbulence dans le récipient de mercure. L'eau déplacée qui se dépose sur le récipient de mercure est éliminée avec la seringue hypodermique. La figure II.2 montre les dispositions des composants du tensiomètre du type que l'on a décrit. Son emploi pour les études du bilan hydrique pour déterminer la composante de drainage à partir de la zone de racines de quelques cultures a donné de bons résultats (Black et al. 1969; Lambert 1970; Millar 1971, Millar et al. 1970)





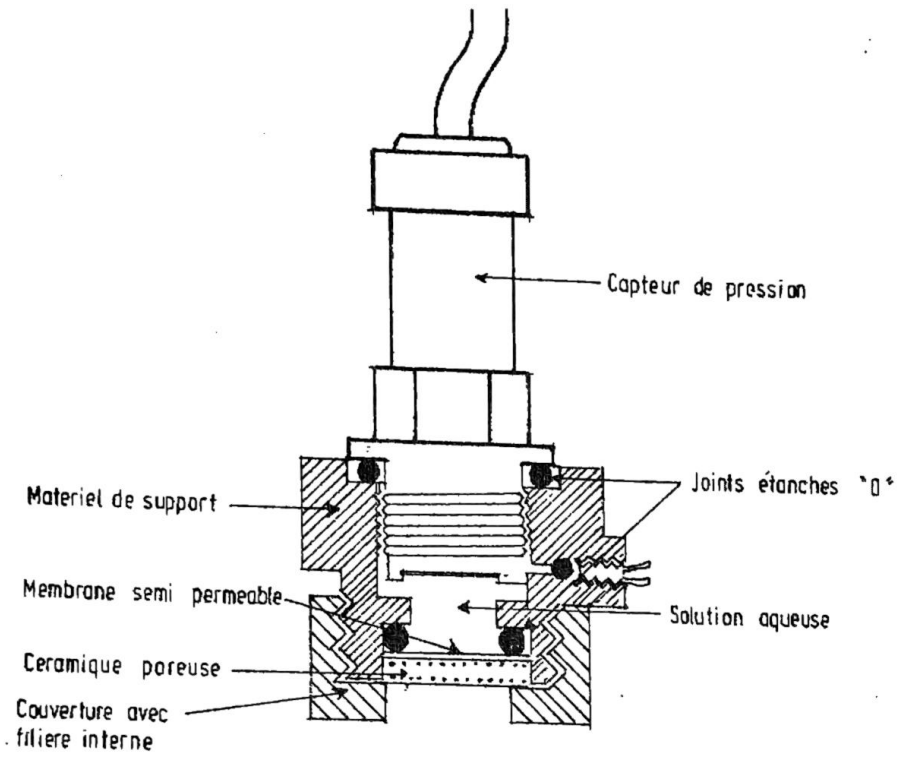


Fig. II -3 Schema du tensiomètre osmotique ( Peck et Rabbidge, 1966 )

### 2.1.3. Tensiomètre Osmotique

Ce tensiomètre a été dessiné par Peck et Robbige (1969) dans CSIRO Australie pour mesurer le potentiel matriciel du sol (figure II-3). Le tensiomètre osmotique est construit sur le principe thermodynamique que la pression hydrostatique ainsi que les éléments dissous affectent le potentiel de l'eau. Ainsi une solution confinée qui à travers une membrane semipermeable, est en contact avec de l'eau pure et libre trouve son équilibre statique au point où la pression hydrostatique est sa pression osmotique. Lorsqu'à la place de l'eau pure et libre on met un sol humide, la pression de la solution diminue dans une quantité égale au potentiel de l'eau. La membrane qui sépare la solution confinée et l'eau du sol est fortement imperméable au soluble confiné (polyéthylène glycol, poids moléculaire 20,000), cependant elle permet l'échange de petites molécules et petits ions.

Cet appareil se sert d'un capteur de pression qui est l'une des branches du pont de wheatstone. Lorsque la pression de la chambre qui contient le solute change à cause de l'entrée ou sortie de l'eau qui traverse la plaque poreuse, la résistance du jaugeur de contraintes change aussi, ce qui est mesuré en termes de millivolts.

Cette procédure est une méthode indirecte parce que le tensiomètre osmotique doit être étalonné à l'aide des solutions Standards de NaCl. Les tensiomètres se soulèvent 0,5 cm de la superficie des différentes solutions pour obtenir la courbe d'étalonnage qui lie les millivolts au potentiel de l'eau (figure II-4).

Cet instrument offre l'avantage par rapport au tensiomètre conventionnel de pouvoir mesurer le potentiel de l'eau entre 0 et -15 bars et à partir de 0,10 m de profondeur du sol.

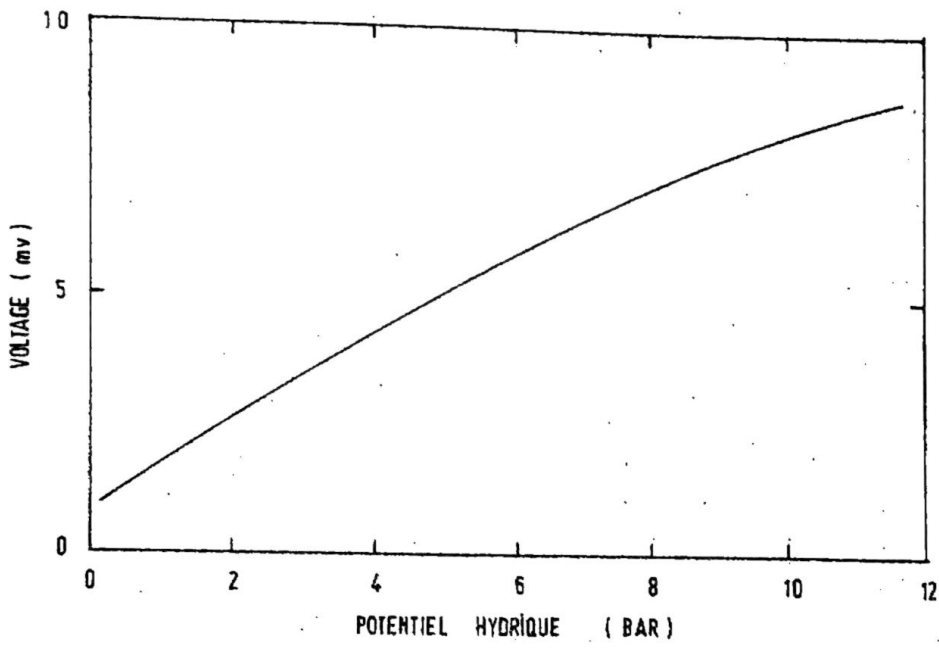


Fig.II-4 Courbe d'étalonnage du tensiomètre osmotique



#### 2.1.4 Blocs de résistance

Ces blocs sont contruits de plusieurs matériaux gypse , nylon et verre. Les blocs sont constitués de deux électrodes enveloppées par le matériau sus-indiqué, lequel permet l'écoulement de l'eau jusqu'à établir l'équilibre avec le sol avoisinant. Les figures II-5 et II-6 montrent les schémas des deux types de blocs les plus utilisés et la figure II-6 présente le bloc portable.

La résistance entre les électrodes dépend du pourcentage d'humidité dans le bloc, la résistance diminue lorsque l'humidité du bloc augmente, la résistance dépend aussi de:

- L'affinité du sol et du matériau poreux pour l'eau
- La quantité d'eau présente
- La vitesse de transfert de l'eau d'un matériau à l'autre
- La conductivité électrique de l'eau en solution qui se trouve dans la zone d'influence des électrodes.

Les blocs doivent être étalonnés pour chaque type de sol et les courbes d'étalonnage peuvent montrer:

- Le pourcentage d'humidité et la résistance (ohms)
- Le pourcentage d'humidité et l'humidité utilisable

Il est recommandé d'étalonner le bloc liant le potentiel matriciel (Succion) en fonction de la résistance, en utilisant la membrane à pression. Dans la figure II-7 on présente des courbes d'étalonnage typiques, exprimées en pourcentage d'humidité, préparé pour l'usine de fabrication pour différents sols de Californie (U.S.A.). La figure II-8 montre des courbes d'étalonnage typiques exprimées en potentiel matriciel pour différents types de bloc.

#### Avantages

Cet appareil ne produit aucune destruction et prend de mesures conti

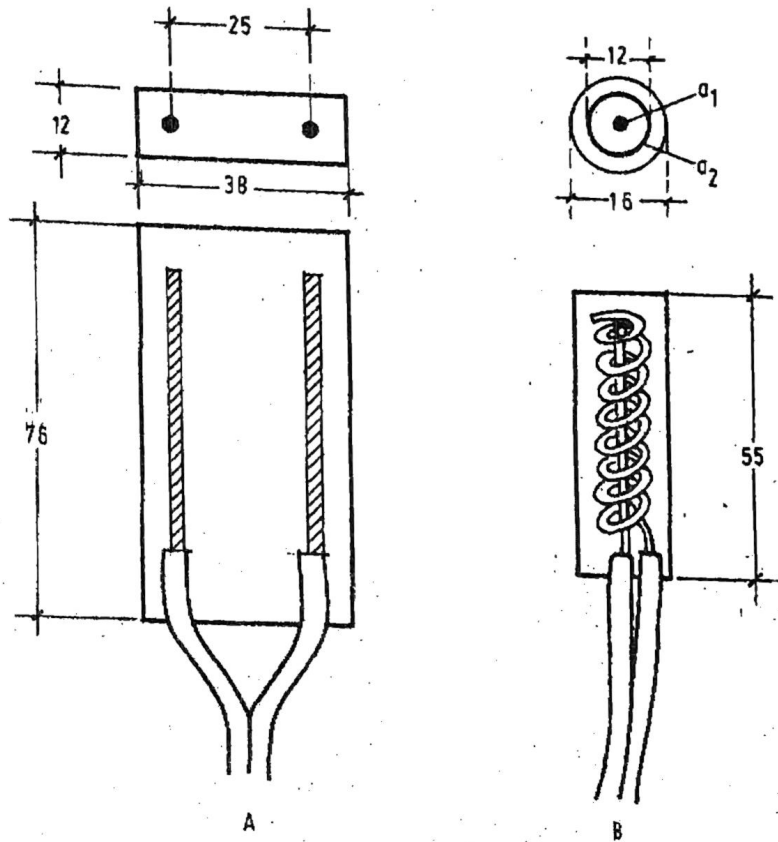


Fig II-5 Blocs de gypse couramment utilisés pour déterminer la teneur en eau du sol

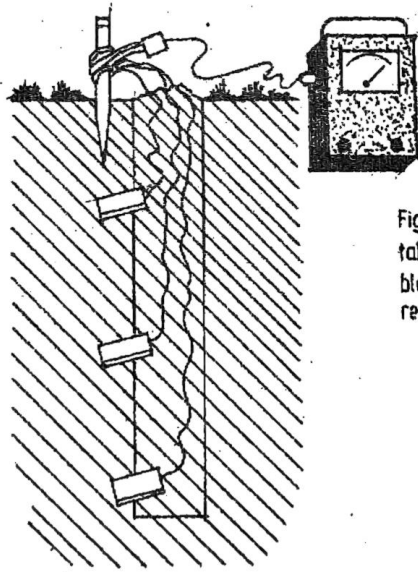
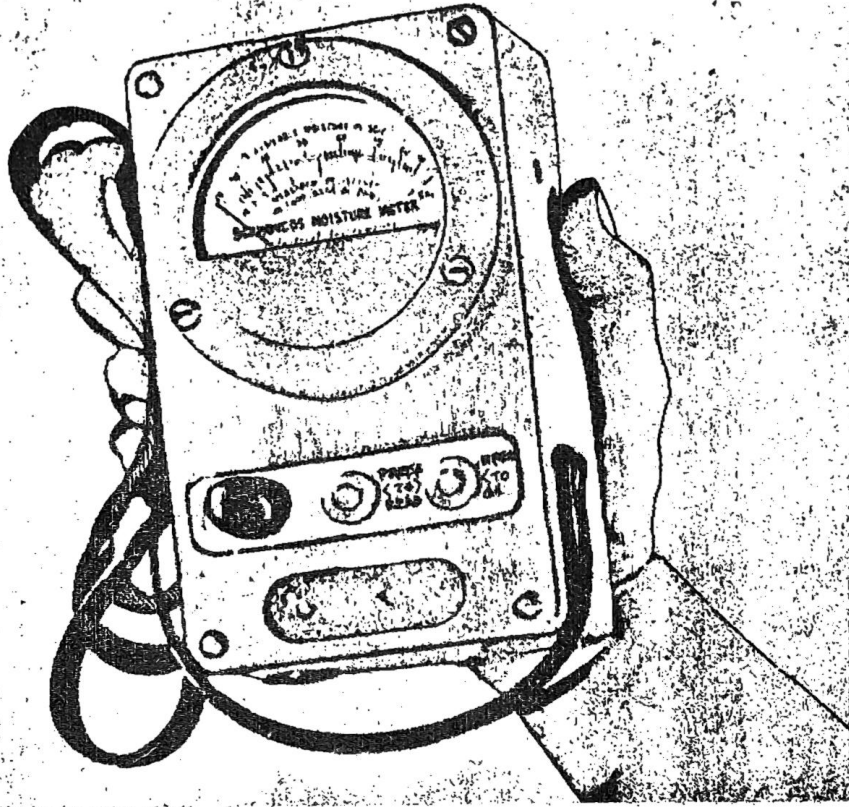


Fig II.-6 Appareil de jaugeage portable pour être utilisé avec les blocs de gypse (Bouyoucos moisture meter).

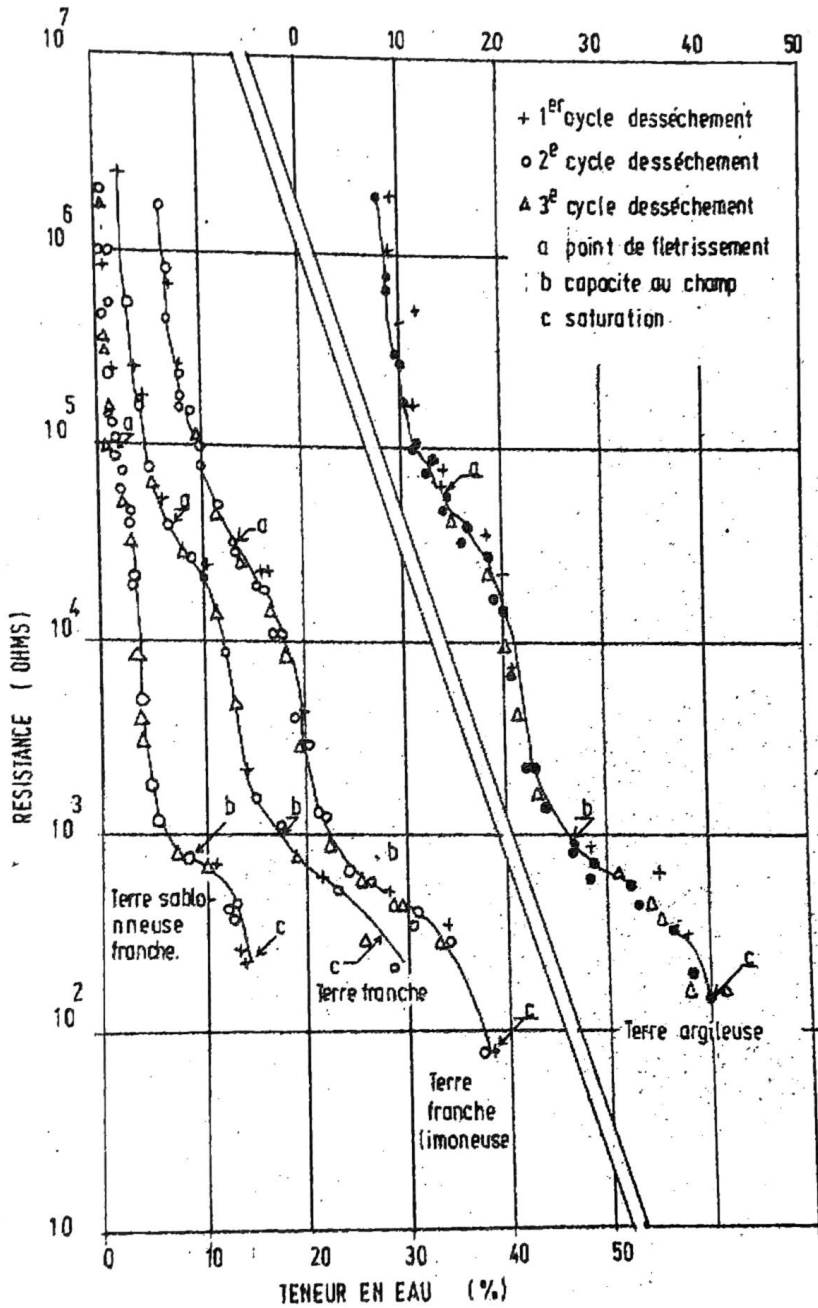
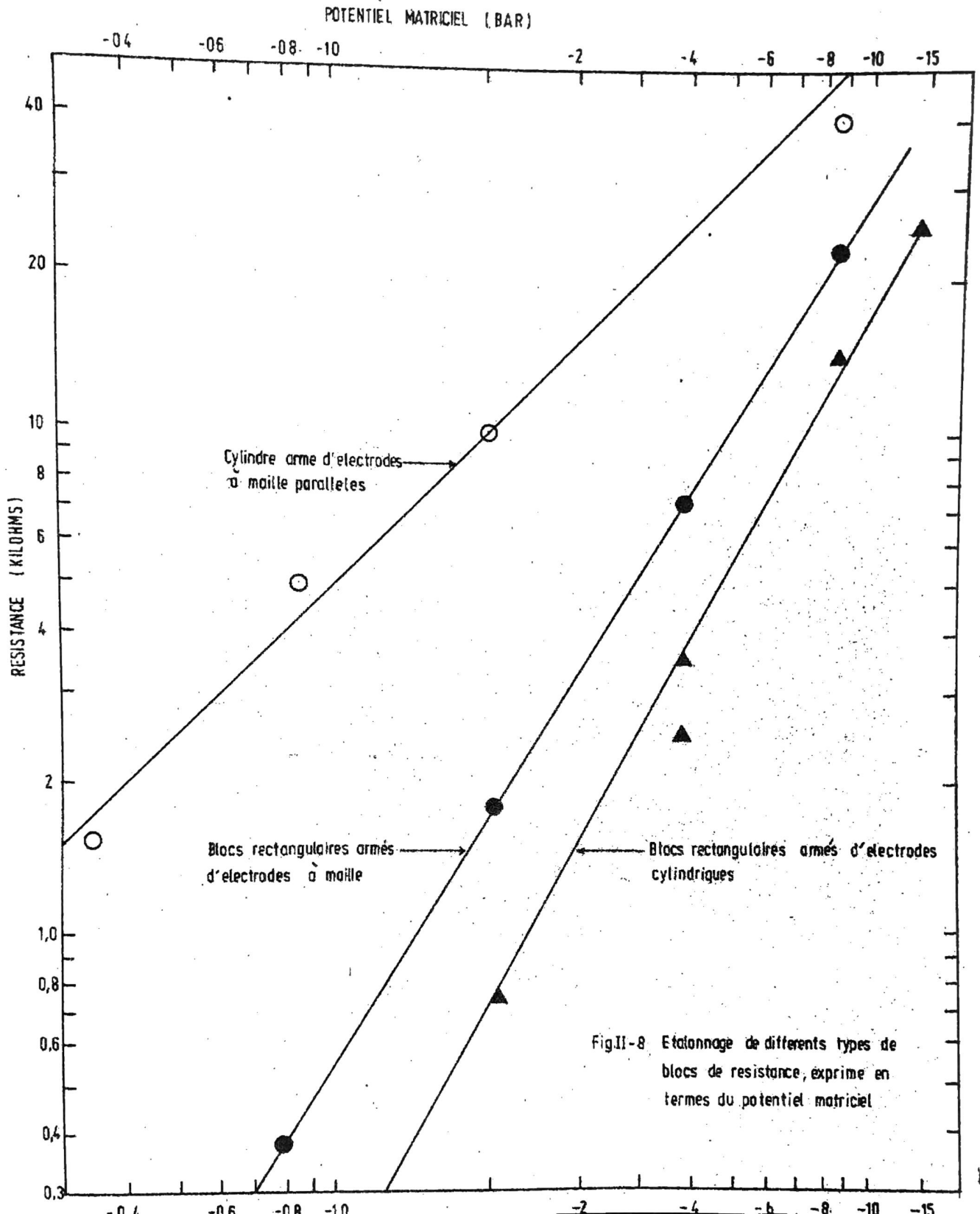


Fig.II-7 Courbes d'étalonnage typiques de blocs de résistance en fonction du pourcentage d'humidité. (Les courbes ont été fournies par le fabricant pour trois (03) types de sols de la Californie)





nues du même point du sol.

- Les unités ne sont pas chères
- L'appareil prend des mesures dans l'intervalle plus sèche de l'humidité du sol, où les tensiomètres conventionnels ne peuvent pas être utilisés.
- Les résultats des potentiels matriciels obtenus sont acceptables.

Inconvénients:

- L'appareil est très sensible aux électrolytes et partant ne doit pas être utilisé dans des sols salins.
- A cause de l'inconvénients précédent et du temps d'utilisation, l'appareil doit être étalonné fréquemment.
- Faible relation entre la teneur en eau et l'indication des blocs
- Les unités sont très variables c'est la raison pour laquelle l'étalonnage doit être individuel.

Malgré les inconvénients signalés, si on prend soin de son emploi les blocs peuvent être utilisés pour la réalisation des études d'irrigation, Taylor et al. (1961), présentent sur le dessin, la construction et l'étalonnage des différents types de blocs de résistance.

#### 2.1.5 Méthodes Radioactives

##### a- Détecteur des neutrons

Les composantes de base sont la source radioactive et le détecteur de la radiation.

La procédure consiste à placer la source radioactive (Americium Beryllium; Am - Be ou Radium - Beryllium, Ra - Be) à la profondeur

désirée dans le profil du sol. La source émet des neutrons à forte vitesse lesquels sont ralentis par les protons (ion  $H^+$ ) de l'eau existante dans le sol. Ces neutrons sont ralentis lorsqu'ils heurtent les protons de la molécule d'eau et ils sont renvoyés à vitesse plus faible et comptés par le détecteur.

D'autres matériaux qui contiennent des protons peuvent jouer le même rôle, c'est la raison pour laquelle, il est nécessaire d'introduire une correction lorsque ces matériaux se trouvent en quantité.

Pour se servir de cet appareil, on doit placer dans le terrain des tubes d'accès, lesquels peuvent être en aluminium, en acier, en fer galvanisé, en cuivre, etc., sauf les tubes de PVC qui absorbent les protons.

Il est important que le tube d'accès soit en contact étroit avec le sol, c'est la raison pour laquelle on le place à pression; le sol qui se trouve à l'intérieur du tube est enlevé par une tarière. Le tube d'accès s'introduit progressivement dans le sol, de la manière suivante; on enfonce le tube dans le sol 0,15 m, et on prélève le sol ensuite on introduit autres 0,15 m et on prélève le sol de nouveau, on continue ainsi jusqu'à ce que l'on arrive à la profondeur désirée (Figure II-9).

Avec l'achat de l'instrument, on reçoit une courbe d'étalonnage absolu (nombre des coups liés à la teneur en eau en volume). Pour des études sur le terrain, il est préférable d'étalonner l'appareil pour chaque type de sol, ceci demande qu'on dispose d'un nombre de coups de référence, lequel est pris lorsque la source de radioactivité est dans sa position de stockage. Le nombre de coups de repère doivent être pris avant et après avoir réalisé les mesures, ainsi les mesures du nombre de coups que l'on réalise sur le sol sont exprimées par rapport au nombre de coups de référence, cela signifie que l'étalonnage présente le rapport nombre de coups dans le sol/ nombre de coups de référence et la teneur en eau en volume. Cet étalonnage évite toute erreur dans le nombre de coups dû à la variation de la température, de l'humidité, de la puissance de la Source de radioactivité ou à



d'autres facteurs au moment de la lecture. La figure II-10, montre les deux types de courbes d'étalonnage, celle du fabricant et celle du consommateur, pour un sol sablonneux, on utilise une sonde Troxler 1257.

La figure II-11, montre une courbe d'étalonnage d'un sol sablonneux qui a été obtenue avec un appareil Nuclear-Chicago P-19 (Millar et al. 1971). Dans la figure II-12, on présente une courbe d'étalonnage absolue qui a été obtenue avec la Sonde Troxler (McHenry et Gill, 1967). La figure II-13, montre une courbe d'étalonnage qui a été obtenue à 0,76 m de profondeur dans différents types de sol. (Taylor et al. 1961), et dans la figure II-13a pour deux types de tubes d'accès.

La courbe d'étalonnage du sol sera valable pendant la période que les conditions initiales ne soient pas modifiées c'est-à-dire que l'on doit garder le même type d'équipement, le même type de tube d'accès et la même symétrie pour le captage des nombres de coups de référence.

Théoriquement, l'aire d'influence de la sonde est infinie, mais dans la pratique elle est limitée. Il existe un domaine à l'intérieur duquel se produit le 90 à 95 % des interactions des neutrons. Van Bavel et al. 1965, pour une sonde introduite dans le sol, a proposé que le diamètre de l'aire d'influence peut être calculé par l'expression:

$$D = 30 (100/\theta)^{0.5} \quad 2.1$$

où:

D = Diamètre de la sphère dont son centre se trouve dans la source radioactive, en mètres.

$\theta$  = Pourcentage d'humidité du sol, en volume

#### Avantage de la méthode

- C'est une procédure non destructive qui permet de déterminer l'humidité dans le même profil du sol.

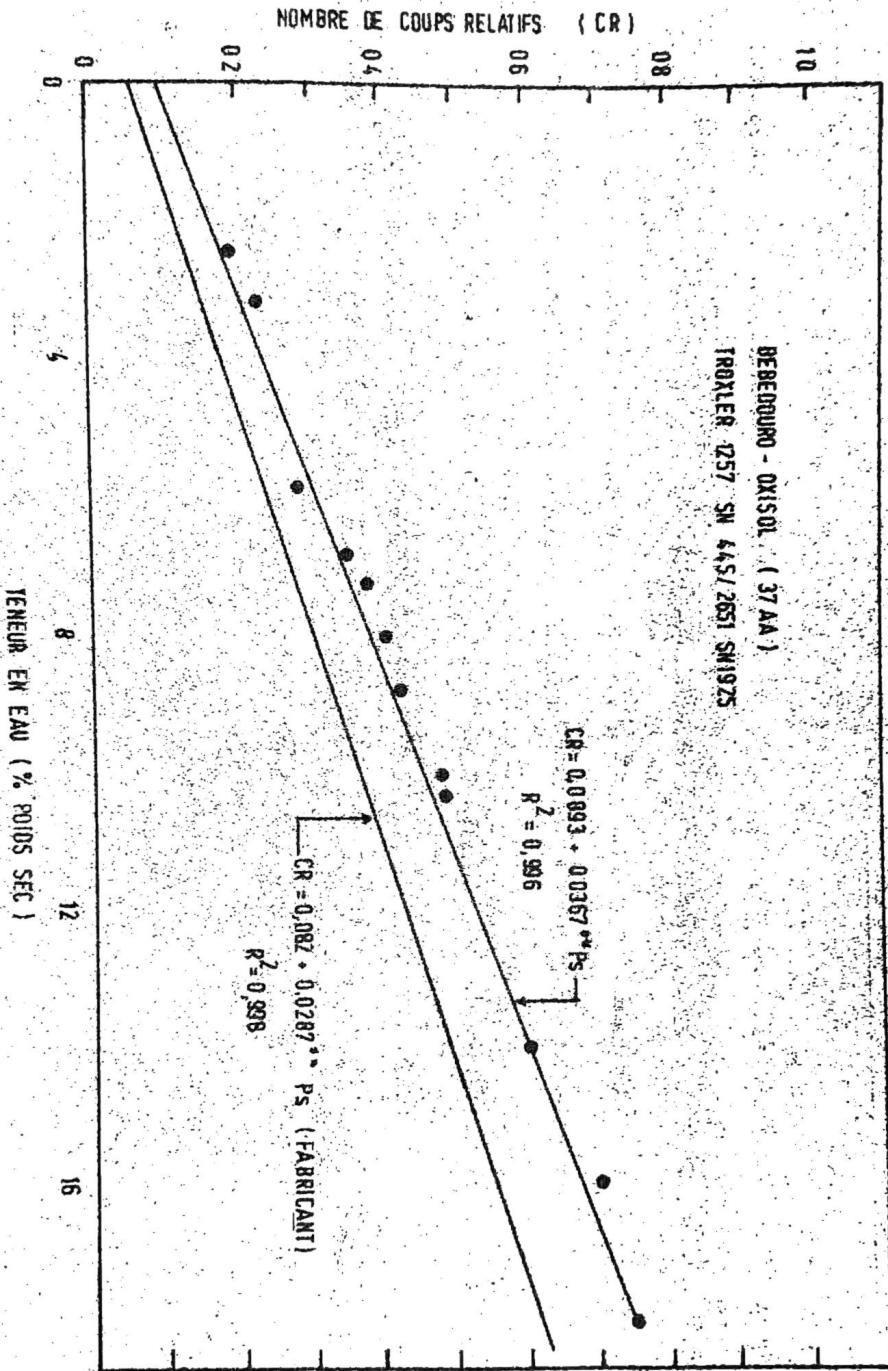


FIGURE 10 Courbe d'étalement relative de la sonde à neutrons dans un oxisol.

TENEUR EN EAU ( cm<sup>3</sup> / cm<sup>3</sup> ) x 100

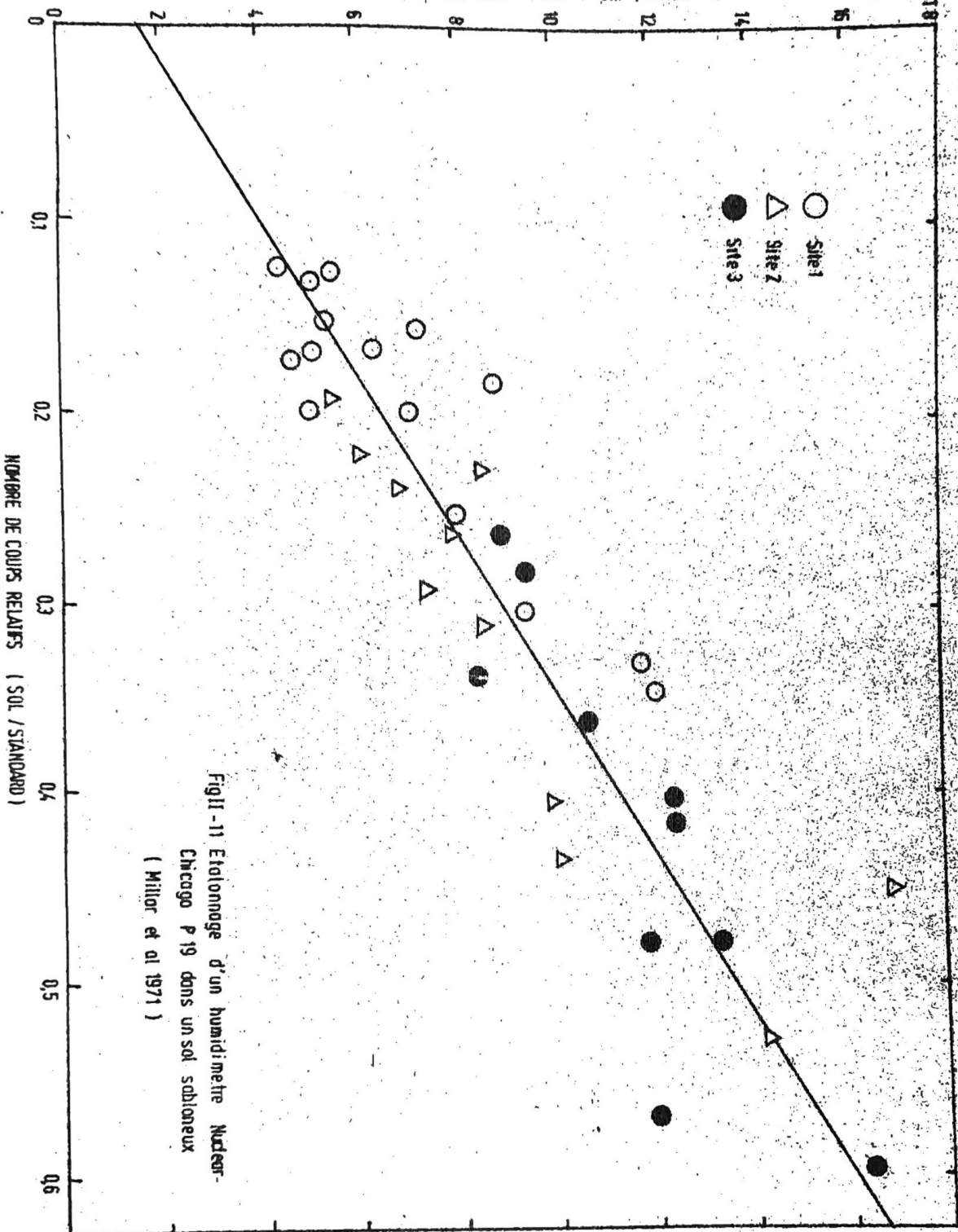
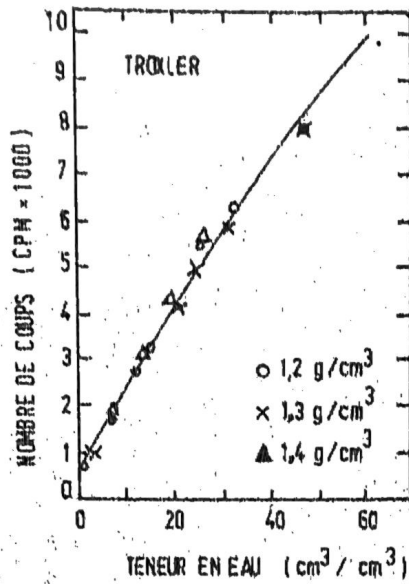
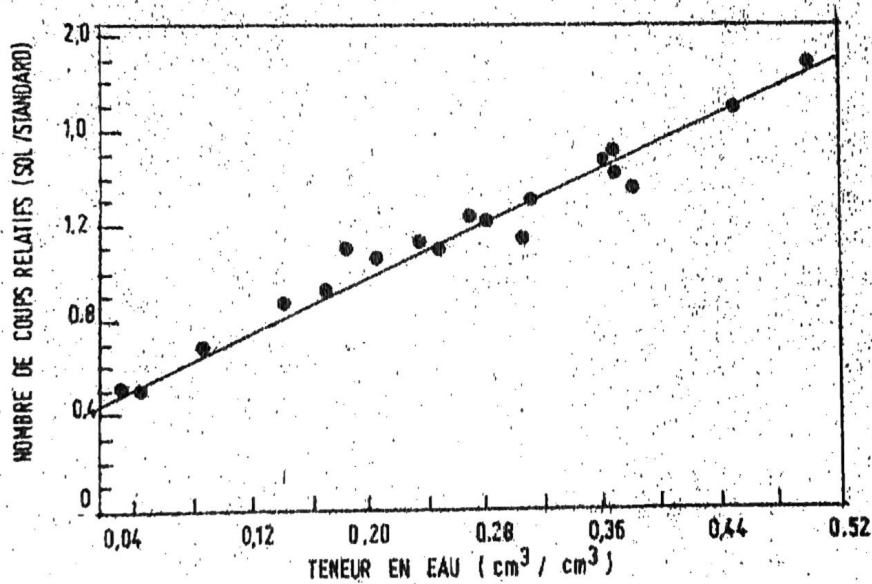


Fig. 11-11 Etalonnage d'un humidimetre Nuclear-  
Chicago P 19 dans un sol sablonneux  
( Millar et al 1971 )





FigII-12 Etalonnage absolue d'un humidimètre Troxler dans un sol limoneux à différentes densités apparentes (Mc Henry et Gill 1967)



FigII-13 Etalonnage relatif d'une sonde à neutrons réalisée à 0,76m de profondeur pour différents types de sols (Taylor, et al 1961)



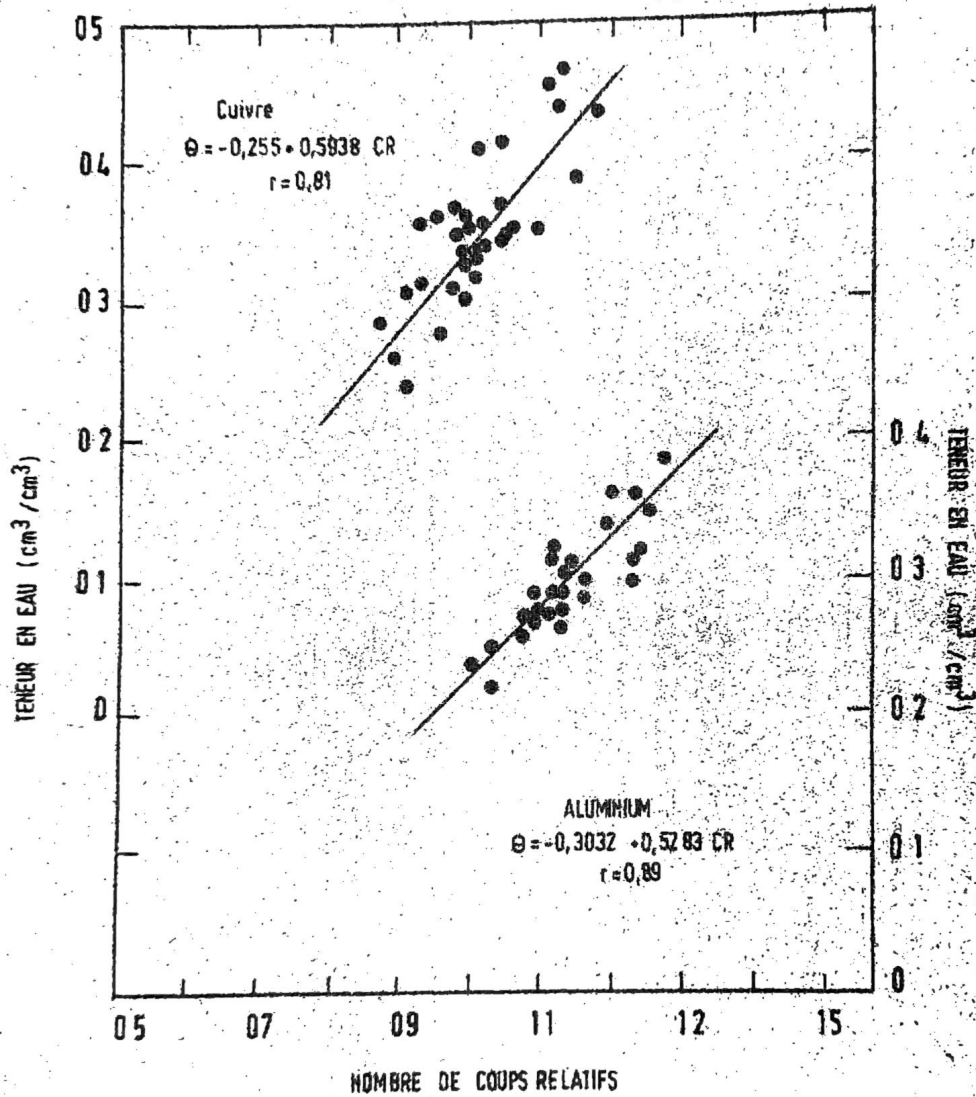


Fig. 11-13a Courbes d'étalonnage d'une sonde à neutrons dans un sol caouenes. on a employé deux types de tubes d'accès

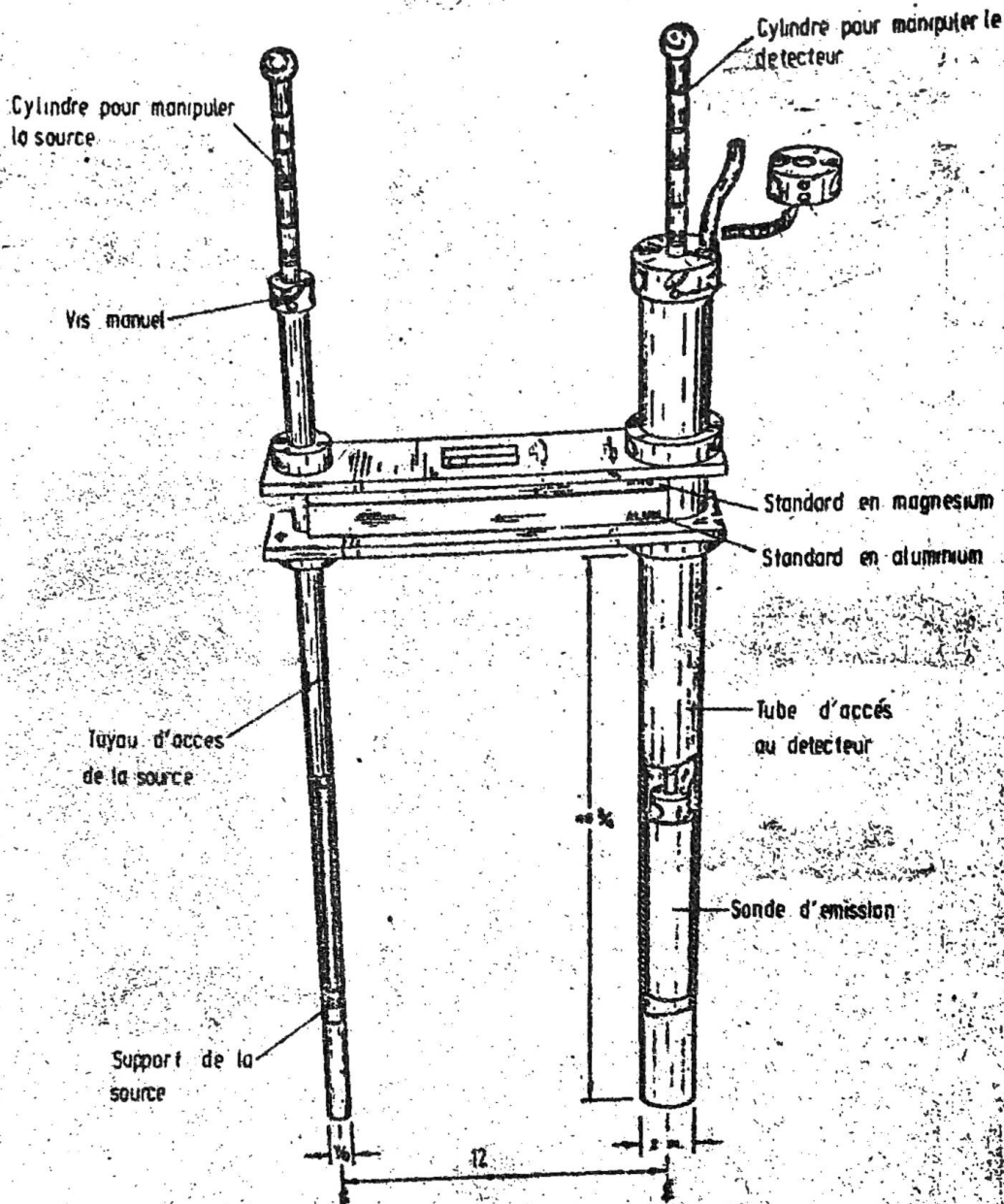


Fig. II - 14 Schema de l'équipement de rayonnement gamma pour les études sur le terrain. ( les dimensions sont en pouces ) Kirkham et Corey 1973

- Permet de mesurer l'humidité dans de profondeurs importantes. Les seules limitations sont imposées par la longueur du tube et par la présence de l'eau souterraine.
- La rapidité de la mesure.
- La représentativité des mesures. Une mesure avec la sonde à neutrons équivaut à 7 mesures par gravimétrie.

#### Inconvénients

Utilisable seulement à partir de 0,30 m de profondeur, on ne peut l'utiliser dans les sols organiques ni grossiers. Il faut établir une courbe d'étalonnage pour chaque type de sol; compte tenu de la rapidité avec laquelle on détermine la teneur en humidité du sol la sonde à neutrons est un appareil indispensable lorsque on a besoin de réaliser un nombre d'important de mesures. Son utilité dans les études du bilan hydrique, de l'évapotranspiration, d'irrigation ont été démontrée dans plusieurs publications (Boodt et al. 1967; Lambert 1970; Holmen et al. 1967).

#### b. Ralentissement des Rayons Gamma

Jusqu'à présent l'emploi des sources radioactives qui émettent des rayons gamma, dans la détermination de la teneur en humidité du sol a été limité aux essais des laboratoires, sur le terrain son utilisation est très restreinte. Le principal inconvénient de la radiation gamma est sa forte puissance de pénétration, cependant elle a une basse puissance d'ionisation.

La méthode consiste à intercaler une colonne de sol entre la source d'émission des radiation gamma et le détecteur (Figure II-N)

#### Avantages et Inconvénients

C'est une méthode non destructive pour la détermination de la teneur en humidité du sol.

Jusqu'à présent, son emploi a été limité à colonnes de sol dans le laboratoire.

Elle a besoin d'un appareil précis pour la mesure. La radiation gamma est fortement dangereuse pour la santé. Pour des plus amples informations sur les sondes à radiation gamma consulter les publications King (1967) et Gardner et Calissendarff (1967)

#### 2.1.6

Le transfert de chaleur

Cette méthode employée pour déterminer le potentiel de l'eau du sol, qui a été présentée par Phène et al. (1971), utilise le principe que la vitesse de dissipation de chaleur dans un milieu poreux dépend de la teneur en humidité de celui-ci.

D'après la loi de Fourier pour le transfert de chaleur, l'intensité de l'écoulement de chaleur est fonction de la conductivité Thermique du sol (K) et du gradient de température ( $dT/dz$ ), ceci se présente dans l'expression suivante:

$$f = -K(\theta) dT/dz.$$

2.2

Le fait que la conductivité thermique augmente exponentiellement en fonction de la teneur en eau a servi pour l'emploi dans la détermination de la teneur en eau dans le sol.

La teneur en eau d'un milieu poreux peut être mesurée si on place une source d'énergie dans un point et sur lequel on détermine la variation de la température. L'appareil consiste en un Diode à Germanium (RCA IN 2326) qui sert à détecter la température. Le Diode se couvre avec du fil isolé par téflon, lequel fonctionne en tant que dissipateur d'énergie lorsqu'il est traversé par un courant de valeur connue, dans ce sens l'instrument est composé d'un circuit qui alimente le Diode et d'un circuit qui génère l'énergie. L'ensemble de la Diode et du fil dissipateur d'éner-

gie est placé dans un bloc de gypse avec ses sorties pour être connectées au circuit. L'appareil est étalonné en différence de voltage (créé par l'augmentation de température qui a lieu lorsque le circuit générateur d'énergie se met en fonctionnement pendant une période déterminée), et le potentiel matriciel.

#### Avantages

- Les mesures sont indépendantes de la salinité de la solution du sol
- La détermination du potentiel matriciel jusqu'à - 15 bars

Le système est portable.

L'appareil donne au même temps différence de voltage et potentiel matriciel.

L'équipement est de construction relativement facile.

Le coût est acceptable en relation aux autres méthodes.

#### 2.1.7 Psychromètres

L'emploi de psychromètres est très fréquent dans les études du système sol-plante-atmosphère. En micrométéorologie il est utilisé pour déterminer la relation de Bowen (chaleur latente) et dans le système sol-plante pour la détermination du potentiel hydrique (Ehlig, 1962; Hoffman et Herkelrath, 1968; Rowlin, 1966).

Le potentiel de l'eau d'un système est défini comme étant la différence d'énergie entre l'eau soumise à une pression et température données et l'eau libre. Du point de vue thermodynamique la pression de l'eau peut être exprimée en fonction de la pression de vapeur par l'expression suivante:

$$\psi = (RT/v) \ln. (e/e_0) \quad 2.3$$

où:

$\psi$  = Potentiel de l'eau, en bar

R = Constante universelle du gas parfait en bar - cm<sup>3</sup>/mol - K<sup>0</sup>

T = Température absolue, en degrés Kelvin (K<sup>0</sup>)

$v$  = Volume molaire partiel de l'eau, en  $\text{cm}^3/\text{mol}$

$e$  = Pression de la vapeur de l'eau dans le système à température absolue, en millibar

$e_0$  = Pression de la vapeur saturée à température, absolue en millibar

Dans l'expression 2.3, la relation  $(e/e_0)$  est l'humidité relative du système. Pour déterminer le potentiel de l'eau il est nécessaire de connaître l'humidité relative de l'air en équilibre avec le système (Monteith et Owen 1958; Richards et Ogata, 1958). Pour la mesurer on utilise les thermocouples, le plus utilisé est le psychromètre de Peltier (basé sur les effets Peltier) et le psychromètre de Richards (Barrs, 1968; Box, 1965; Dalton et Rowlings, 1968, Ehlig, 1962; Spanner, 1951).

La figure II-15, montre les psychromètres (A), basé sur l'effet Peltier et B de Richard. L'effet Peltier se présente toutes les fois qu'un courant froid traverse un thermocouple. Le couple principal se refroidit tandis que les couples de référence se chauffent. La différence thermique est à l'origine d'une différence de force électromotrice (fem) laquelle peut être déterminée par un microvoltmètre.

Le Psychromètre de Richards et Ogata (1950) emploie un anneau d'argent lequel doit être immergé dans l'eau avant d'être placé dans la chambre d'équilibre qui contient l'échantillon de la plante ou du sol. Cet anneau mouillé représente la température du bulbe humide et les joints de référence représentent la température du bulbe sec.

Dans les relations hydriques du système sol-plante, il est important de mesurer le potentiel de l'eau, c'est la raison pour laquelle ci-après on présente les techniques les plus simples et de moindre coût pour la fabrication des thermocouples ainsi que pour la construction de Psychromètres basés sur l'effet Peltier (Millar 1971).

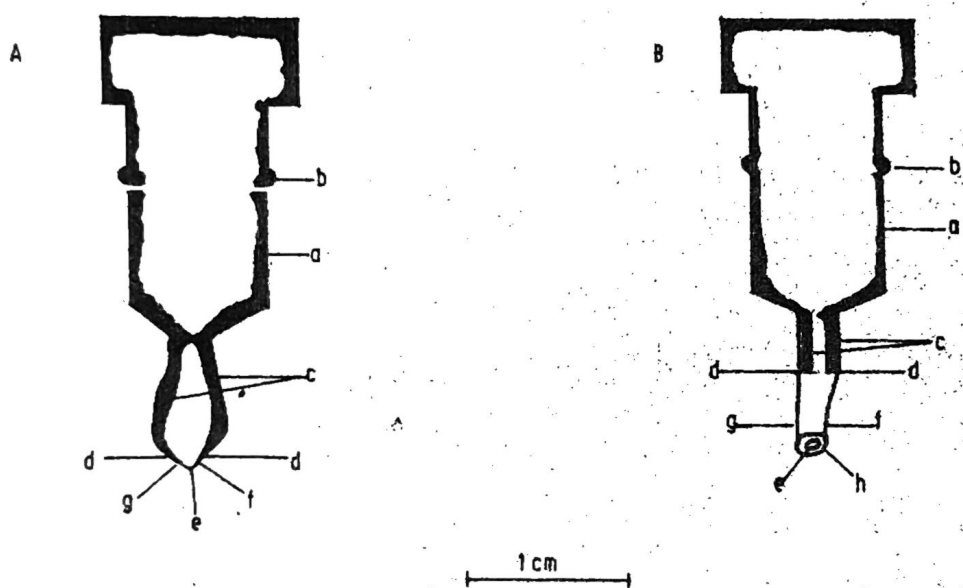


Fig.II 15 Profils des psychromètres spanner (Effet Peltier), A, et de Richards et Ogata B. a: Matériau solide en bronze ou teflon, b: anneau d'étanchéité, c: fils de cuivre, d: joints de référence e: joint litre, f: chromel 25 microns g: constantan 25 microns et h: anneau en argent.



### a- Construction de Thermocouples

Le Chromel et le Constantan sont les matériaux les plus employés pour la construction de Thermocouples pour les psychromètres qui créent une fem de  $60 \mu\text{v}/^\circ\text{C}$  dans l'intervalle d'utilisation des psychromètres.

Compte tenu que les fils sont très fins (25 microns) et qu'il est nécessaire d'assurer un joint sphérique et forte entre le Chromel et le Constantan, il faut les tenir ensemble avant de les souder pour former le thermocouple, on arrive à ceci: en plaçant les fils dans un support en V (figure II-16a). D'abord, on place dans le support un fil (le Chromel par exemple) une extrémité du fil est collé à l'aide du ruban adhésif et dans l'autre extrémité se place un poids (2 gr) pour tirer le fil. On répète l'opération par l'autre fil (Constantan). Une fois que les deux fils sont placés sur le support on les met en contact étroit dans la largeur du support. A l'aide d'une loupe, on s'assure que les fils sont en étroit contact en tous points, pour garder le Chromel et le Constantan en contact on utilise du vernis transparent.

La soudure s'effectue par le biais de la décharge d'un condensateur à travers les fils et sur une superficie plate en graphite à l'aide du circuit électrique montré à la figure II-17. Cette opération doit être réalisée à l'aide d'un microscope pour s'assurer que les fils soient disposés perpendiculairement au graphite avant de déclencher la décharge et aussi pour assurer le succès de la soudure.

Le circuit électrique pour réaliser la soudure varie d'après le type de courant disponible: continu ou alternatif. La figure II-17, présente un circuit simple pour le cas où l'on dispose de courant continu. Si on ne dispose pas d'une source d'énergie d'au moins 40 volts, on utilisera du courant alternatif. Dans ce cas il faut rectifier le courant afin de le rendre polarisé, Les circuits de rectification sont faciles à construire. L'un des procédés les plus utilisés, c'est la diode au silicium. La diode à la propriété de bloquer le passage du courant dans un sens mais



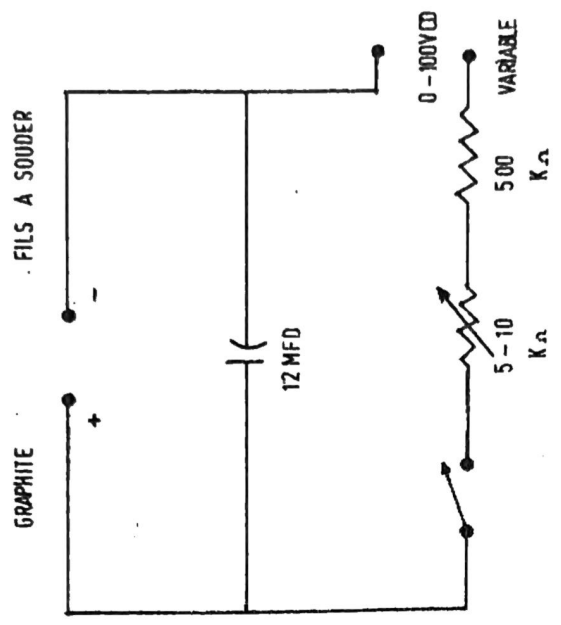
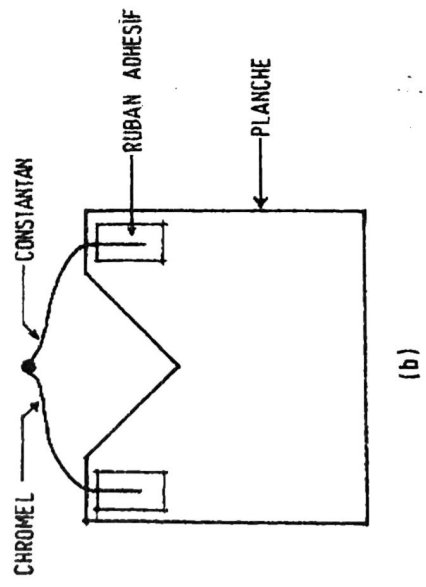
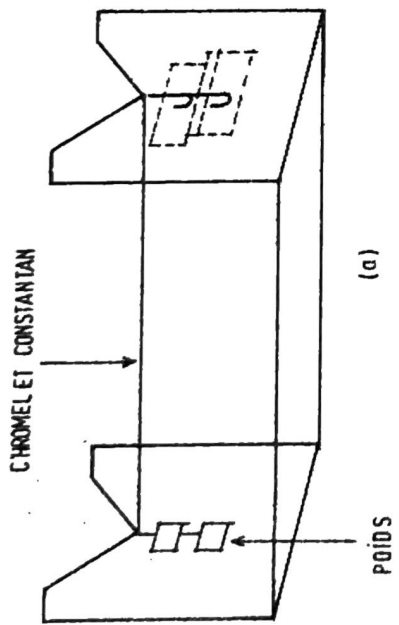


Fig.II-17 Circuit pour la soudure par le biais de la décharge d'un condensateur à l'aide d'un courant continu

Fig.II-16 Support pour maintenir les fils de Chromel et Constantan en contact étroit et fixé. les thermocouples.

elle permet l'écoulement du courant dans l'autre sens. Dans la figure II-18 a on montre le circuit convenable pour le courant alternatif de 220 volts; lequel est réduit à 40 VCA à l'aide d'un Rhéostat et le courant se polarise avec un rectificateur de 75 ma. Le circuit est complété avec un condensateur électrolytique de 12 MFD. Si le courant à une intensité plus forte, il est nécessaire d'employer deux diodes en parallèle en série avec deux résistances pour obtenir la polarisation convenable. Les résistances seront de la même valeur pour éviter le travail différent des rectificateurs et produire un (01) volt de chute de voltage. Ce dernier circuit est présenté dans la figure II-18 b. Pour souder, on place les fils dans un support ou micromanipulateur qui permet le déplacement linéaire. On charge le condensateur pendant 2 à 5 secondes, ensuite on déplace l'extrémité avec le graphite jusqu'à ce qu'elle prend contact avec les fils et on décharge le condensateur.

A fin de conserver les thermocouples pour son utilisation postérieure dans la fabrication de psychromètres, il est nécessaire d'utiliser du ruban adhésif. Puis on fixe les extrémités sur un morceau de carton en V tel que montre dans la figure II-16-b.

#### b- Construction des Psychromètres

La partie de base des psychromètres que ce soit pour matériel végétal ou pour le sol est la même, cependant les psychromètres pour les tissus végétaux comportent une chambre pour placer l'échantillon (figure II-19). Au contraire, les psychromètres pour le sol, présentent un godet poreux ou une maille très fine en acier inoxydable qui entoure le thermocouple (Figure II-20).

Pour la construction des composantes de base d'un psychromètre, on peut utiliser de l'acier inoxydable, du cuivre, acryl, etc. Cependant le matériel le plus utilisé est le teflon, parce qu'il est facile à travailler et il n'absorbe pas de l'eau (Merrill, 1968).

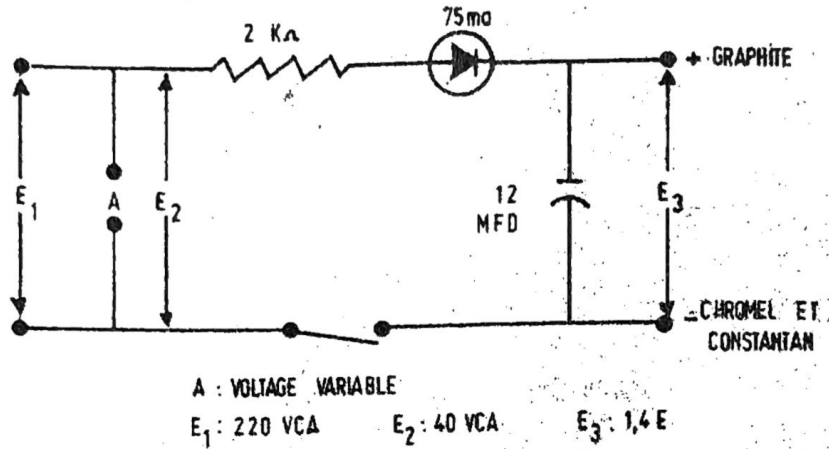


Fig.II-18a Circuit pour souder par le biais de la charge d'un condensateur, a l'aide d'un courant alternatif rectifié ( Rectification mono-alternance )

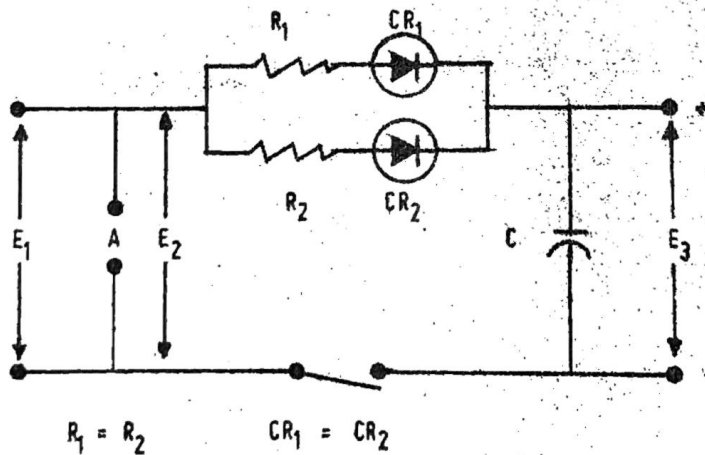


Fig.II-18b Circuit pour la rectification du courant alternatif d'une intensite plus grande.

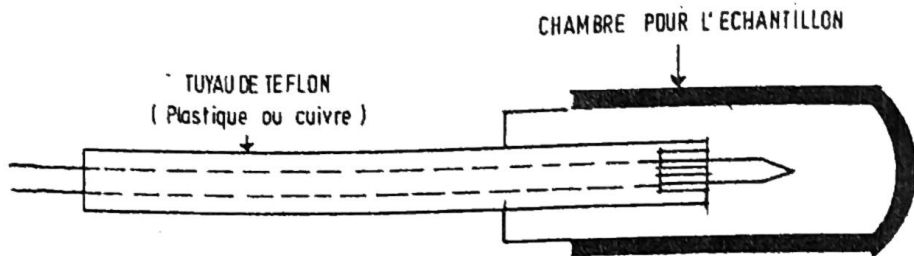


Fig.II-19 Psychromètre pour déterminer le potentiel hydrique dans des échantillons des végétaux ou des sols. ( Millar 1971 )

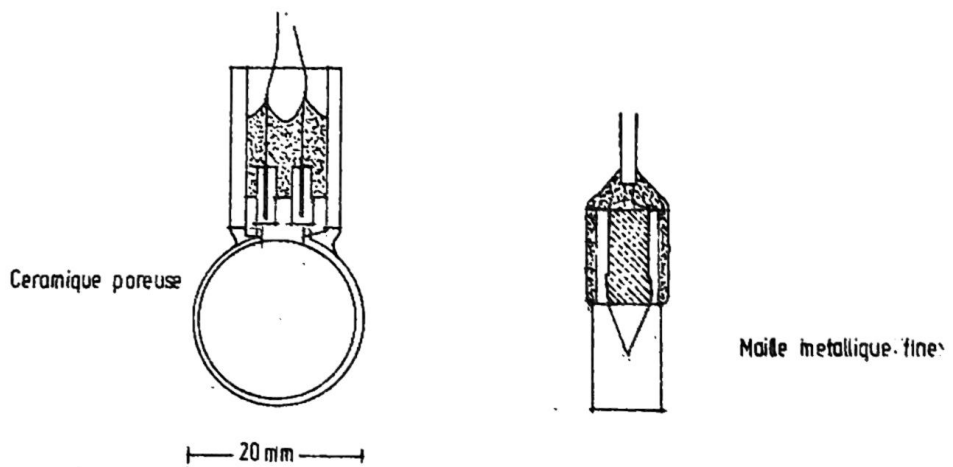


Fig.II- 20 Psychromètre pour déterminer in situ le potentiel hydrique dans le sol ( Dalton et Rawlins, 1967 )

On prend une barre de téflon de 1,5 cm de diamètre qu'on place dans un tour. On perce un trou central d'un cm de diamètre et 3 cm de long, on coupe la barre à 3 mm au delà des 3 cm de long, en obtenant ainsi un cylindre qui est perforé seulement à une seule extrémité. On lisse l'extrémité fermée et on fait deux petites perforations avec un épingle, par lesquelles on doit faire passer deux fils en cuivre de 1 mm de diamètre (22 ga). A ces fils, on soude deux cables en cuivre isolés lesquels jouent le rôle d'extension pour arriver à la boîte de distribution du courant froid. (la figure II-21, montre la séquence à suivre). La soudure doit être isolée par un tuyau en plastique ou un ruban isolant. Les fils en cuivre (22 ga) sont déplacés jusqu'à ce que la soudure avec la couverture isolante empêchent le mouvement: ces fils sont coupés à 6 mm, le point de coupure est lissé jusqu'à ce qu'on obtienne une superficie plane.

A partir de ce moment, tout le processus de construction est exécuté sous le microscope. Avec une lame de rasoir on fait une rainure sur la superficie plane. la coupure doit avoir une profondeur de 0,5 mm pour permettre le déplacement du thermocouple qui a été déjà préparé.

Les extrémités du thermocouple sont placées dans les rainures et à l'aide d'un pince on serre le fil du cuivre pour assurer un contact mécanique. Avec une lame de rasoir, on élimine l'excédant du fil du thermocouple. Jusqu'à ce niveau on a terminé la partie de base du psychromètre, cependant il est nécessaire de lui donner une souplesse plus grande laquelle lui est donnée avec un morceau de tuyau en téflon, en cuivre ou en bois d'un diamètre extérieur, tel qu'il soit adéquat à la cavité centrale. A ceci, on ajoute une chambre pour l'analyse des échantillons de végétaux ou une céramique poreuse pour des échantillons de sols (Figure II-19 et II-20). La chambre pour l'analyse d'échantillons de végétaux doit être de 2,5 cm<sup>3</sup> de capacité, elle peut être en téflon ou en acier inoxydable. Ce dernier matériau a donné de bons résultats mais il y a des difficultés dans la construction (Barrs, 1968).

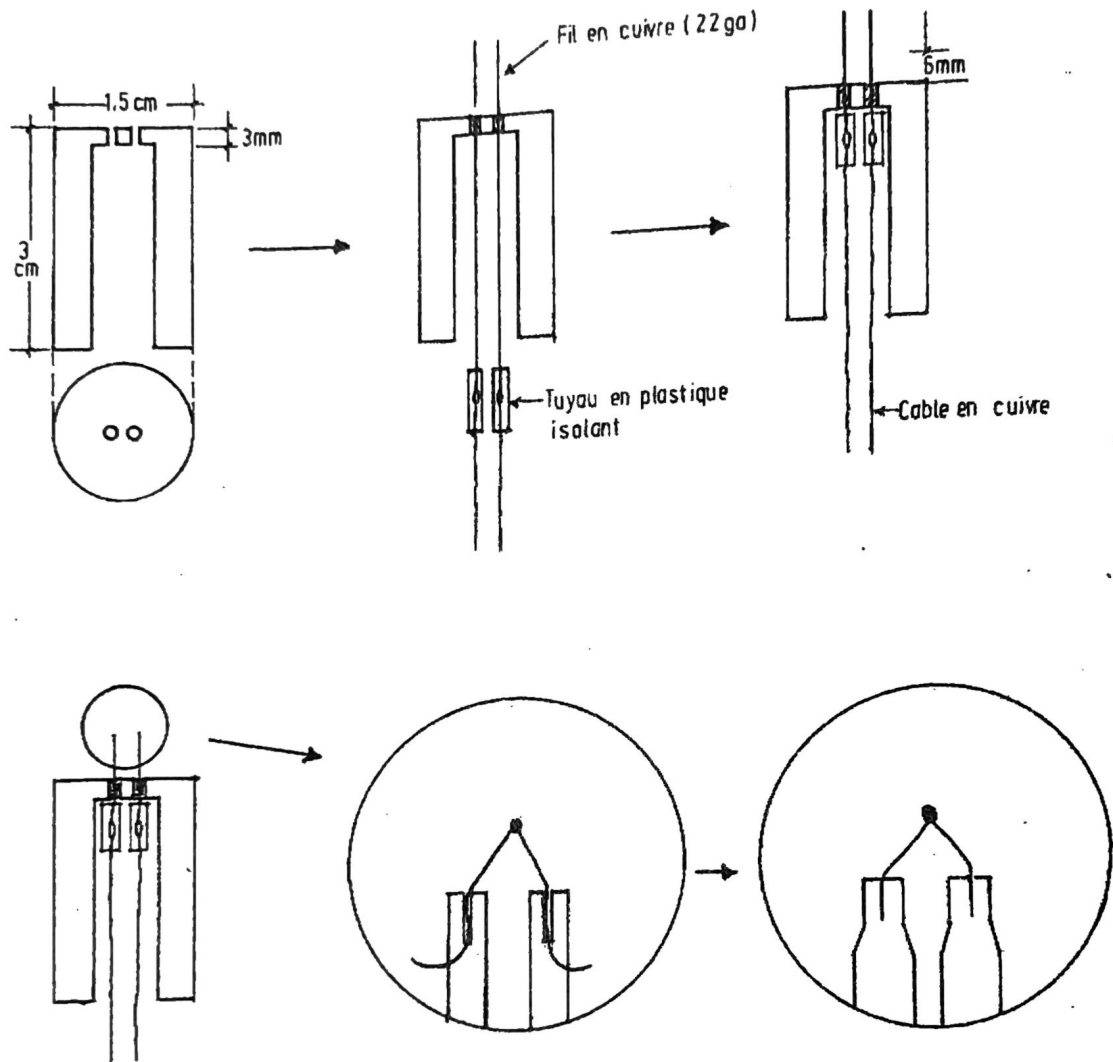


Fig.II - 21 Séquence de la construction et montage d'un psychomètre du type Peltier ( Millar 1971 )

Pour éliminer la présence d'éléments nuisibles adhère au thermocouple, on le lave avec de l'eau bouillie, ensuite avec de l'acétone et finalement on le rince avec de l'eau distillée. L'excès d'humidité est éliminée à l'aide d'un courant d'air sec.

#### c. L'étalonnage

Afin d'étalonner les psychromètres, il est nécessaire d'enduire les parois internes de la chambre avec du papier filtre, pour ce faire on place un morceau rectangulaire dans la partie latérale et un morceau circulaire dans la base. On met dans le papier filtre de 4 à 5 gouttes d'une solution de NaCl de molarité connue. Dans le tableau II-1, on montre une liste de potentiels d'eau à différentes températures pour des solutions de NaCl de plusieurs molarités (Lang, 1967). Pour l'étalonnage des psychromètres, généralement, on utilise des solutions de NaCl de molarités 0,05; 0,1; 0,3 et 0,5 à la température de 25°C. Les potentiels d'eau correspondants sont -2,34 bar; 4,62 bars - 13,68 bars et - 22,8 bars. Chaque psychromètre doit être étalonné avec toutes les solutions à la même température. Après avoir préparé les psychromètres avec une solution molaire connue, il sont placés dans un bain à température constante. En général, après 2 à 2,5 heures l'équilibre est établi et on peut faire la lecture. La figure II-22, montre la variation de la fem en fonction du temps pour un psychromètre pour un échantillon végétal (Millar, 1967).

Pour chaque psychromètre, on élabore un graphique en termes de microvolts ( $\mu v$ ) et potentiel hydrique de la solution (Figure II-23). Les potentiels hydriques pour les molarités et température de travail ont été obtenus du tableau II-1. Dans la figure II-24, on montre les courbes d'étalonnage à plusieurs températures (Millar et al. 1968).

#### d. Circuit électrique et lectures

La figure II-25 présente le schéma de circuit électrique pour faire passer le courant froid aux psychromètres. (Les composantes du circuit

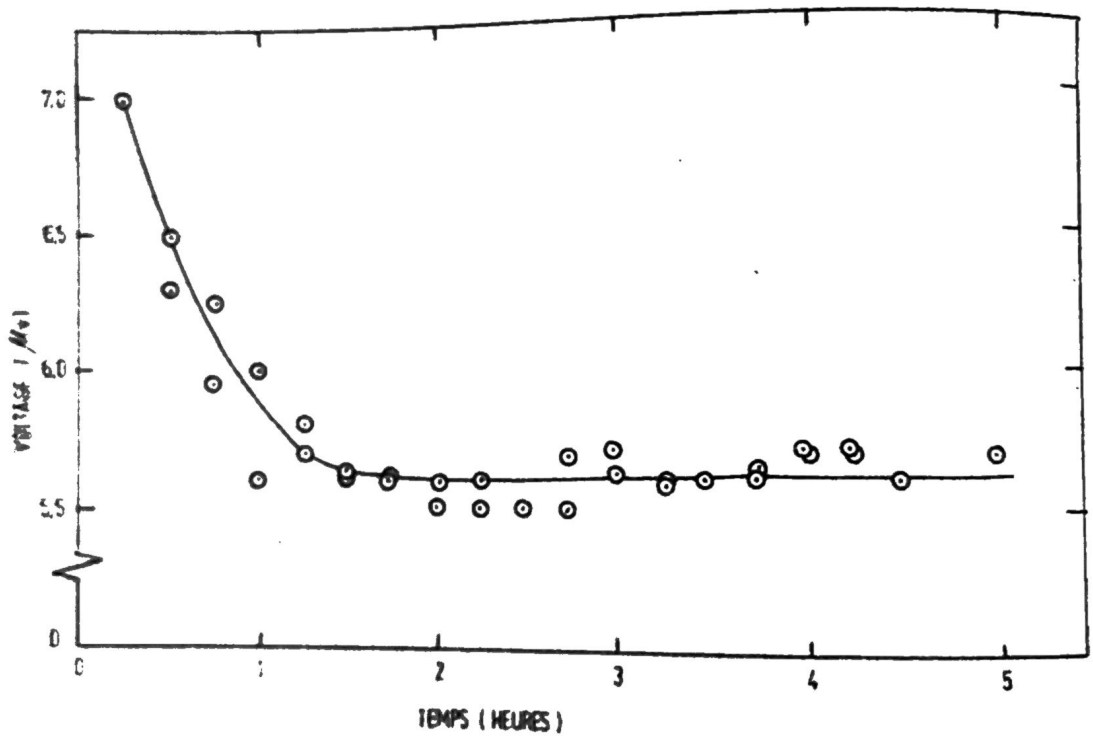
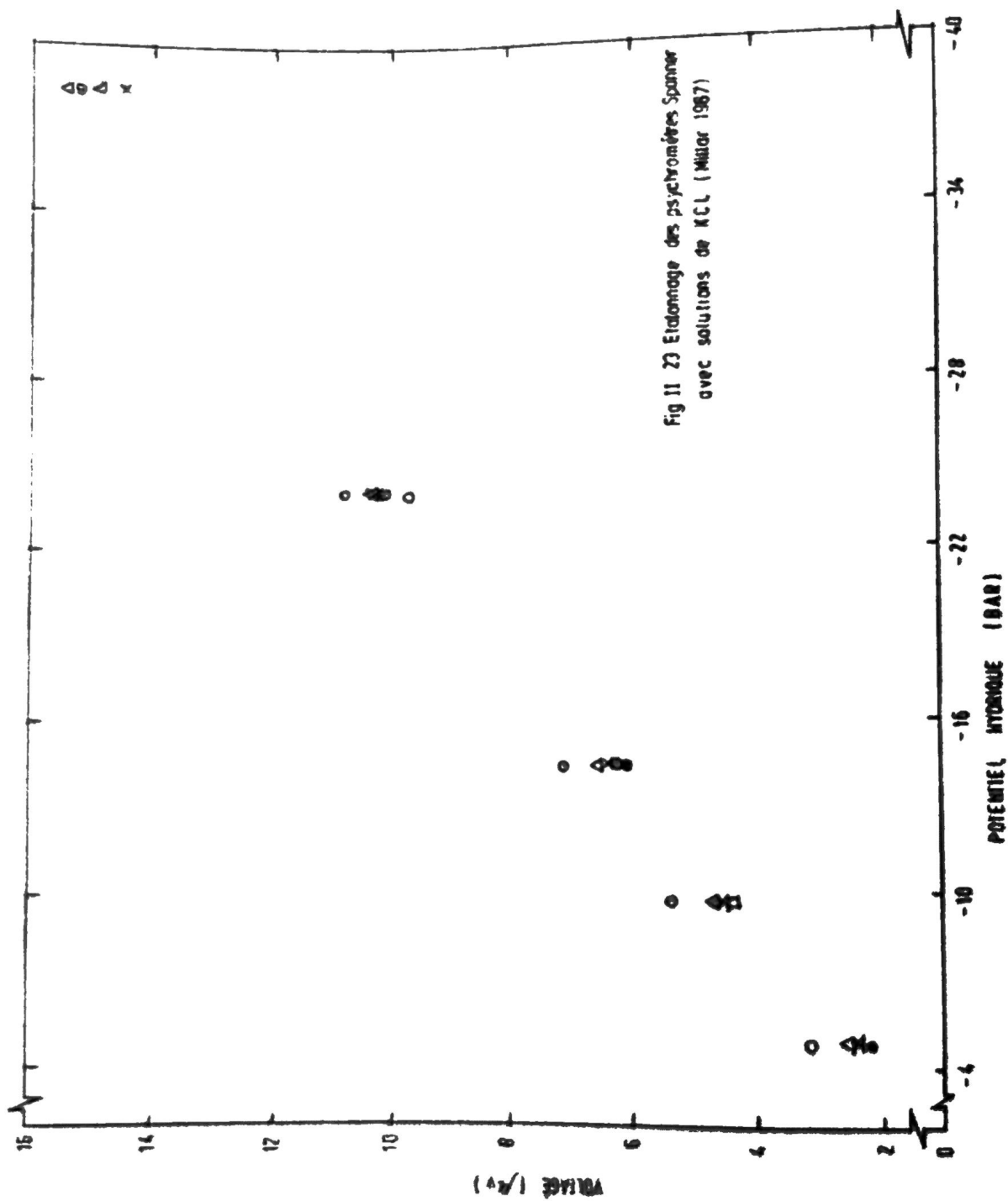


Fig. 22 Force electromotrice en fonction du temps pour un psychromètre spanner, type peltier, employé en échantillon de feuilles d'or (Miller 1967)





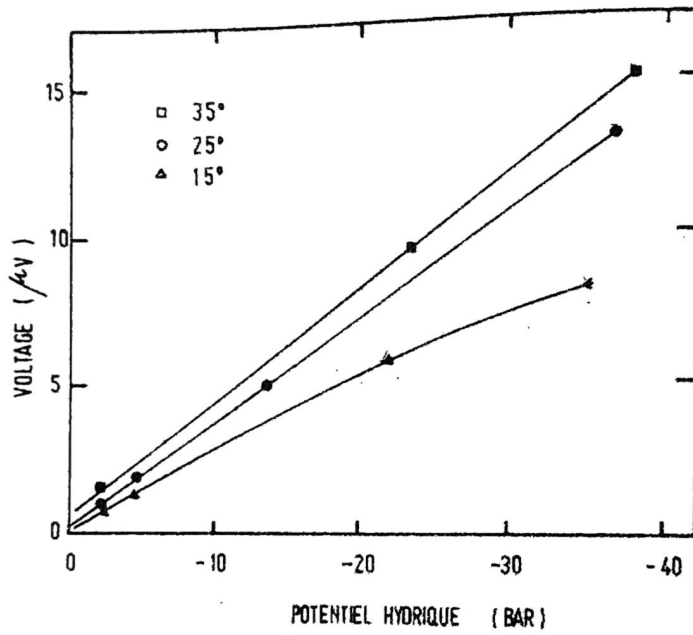


Fig.-II 24 Courbe d'étalonnage d'un psychromètre de Peltier à 15°, 25° et 35°C ( Millar, Lang et Gardner, 1969 )

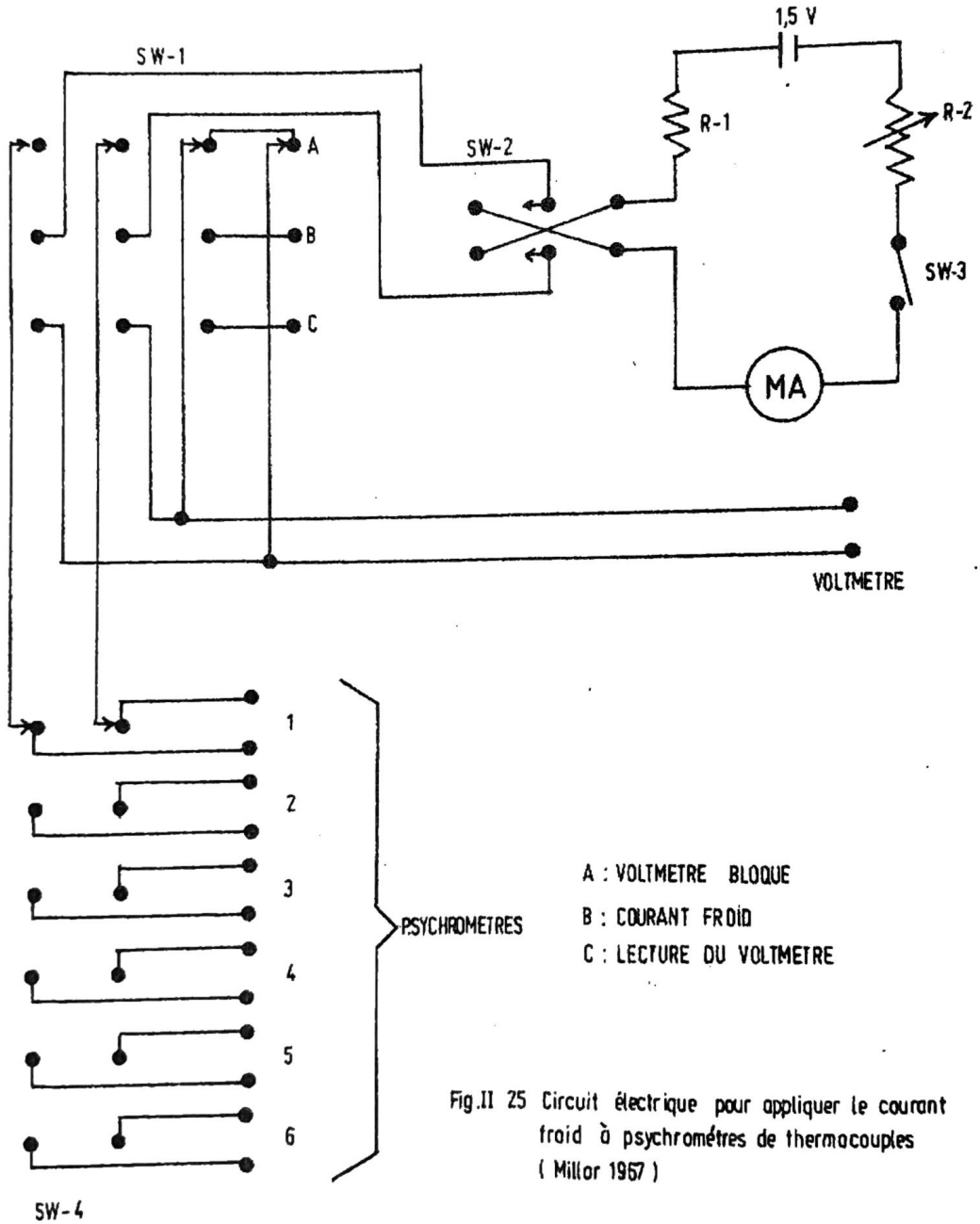


Fig.II 25 Circuit électrique pour appliquer le courant froid à psychromètres de thermocouples ( Millor 1967 )

peuvent être achetés dans une maison de vente de matériel électronique. L'intensité du courant froid dépend de la qualité du psychromètre, pour celui qui a été décrit on doit utiliser un courant de 3 ma. Une fois que le psychromètre a été branché au circuit, on fait passer le courant à travers le thermocouple et on stabilise l'intensité (à 3 ma), à l'aide du potentiomètre variable R-2 (figure II-25).

Lorsqu'il s'agit de psychromètres de dessins différents, on doit chercher l'intensité du courant la plus adéquate (Dalton et Rowlins, 1968), pour ce faire on met en contact les psychromètres avec les chambres propres et sèches, à la boîte de distribution de courant et à l'aide du potentiomètre variable (R-2), on applique un courant de 2 ma, pendant 15 secondes, après ce temps, on fait la lecture d'après la séquence que l'on a indiquée plus haut. On répète l'opération pour des courants de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, et 10 ma. Pour chaque psychromètre on prépare un graphique de la force électromotrice en fonction de l'intensité du courant. En général, la force électromotrice augmente avec l'intensité du courant jusqu'à trouver le maximum, ensuite elle diminue (Hoffman et Herkelrath, 1968). La première partie de cette courbe est le résultat de l'effet Peltier (refroidissement du thermocouple) et la deuxième partie correspond à l'effet Joule (chauffement du thermocouple). Le courant adéquat pour le psychromètre est celui qui se trouve avant le maximum dans la courbe qui lie la force électromotrice et l'intensité du courant.

Pour faire les lectures des psychromètres, on a besoin d'un voltmètre très sensible parce que la force électromotrice générée par les thermocouples est très faible (microvolts). Le microvoltmètre doit disposer d'un mécanisme pour mesurer le voltage nul ainsi qu'une intervalle de lecture de 10 - 0 - 10 v et 30 - 0 - 30 v. Les microvoltmètres les plus utilisés sont les modèles 148 et 150 de la compagnie Keithley ainsi que le microvoltmètre MJ - 55 de la Wescor dans lequel est inclus le circuit qui produit l'effet Peltier.

Avant de faire les lectures il est nécessaire de vérifier si les psychromètres possèdent la polarité adéquate pour recevoir le courant. Les psychromètres sont connectés de telle manière que le courant travers d'abord le Constantan et après le Chromel. Si le passage du courant se fait dans le sens contraire on aura le chauffage au lieu du refroidissement. Dans les cas des psychromètres dont leur thermocouples sont achetés dans le commerce, les fils montrent leur polarités.

La difficulté se présente lorsque les thermocouples sont construits au laboratoire où il n'est pas possible d'identifier la polarité des fils. En général, les psychromètres basés sur l'effet Peltier possèdent une sensibilité entre  $-0,3$  et  $0,4 \mu\text{v}/\text{bar}$  (Rowlins, 1966). Ce renseignement est employé pour trouver la polarité des psychromètres à l'aide d'une solution de NaCl de molairité connue.

Lorsqu'on travaille avec des échantillons végétaux, ceux-ci doivent être placés dans la chambre du psychromètre de la même façon comme on a placé le papier filtre pour leur étalonnage. Dans ce cas, la lecture en microvolts est utilisée pour obtenir le potentiel hydrique de l'échantillon, à l'aide de la courbe d'étalonnage.

Lorsqu'on emploie les psychromètres pour des échantillons du sol, on recommande l'utilisation d'un thermocouple additionnel en cuivre et en constantan dans le même sol afin d'obtenir le potentiel de l'eau à la température du sol. Ceci exige que les psychromètres soient étalonnés au moins pour trois températures (15, 30 et 45 degrés centigrades). En général, les températures du sol ne coïncident pas avec les températures d'étalonnage et dans ce cas, il faut interpoler pour obtenir le potentiel hydrique du sol.

Des nouvelles techniques ont été développées pour la détermination du potentiel hydrique in situ, lesquelles sont utilisées dans les études des

relations hydriques du système sol-plante (Hoffman et Splinter, 1968; Manohar, 1966; Millar et al. 1969; Rawlins et Dalton, 1967, Millar 1971; Newton et Thurtell, 1972; Newman et al. 1974).

## 2. Expressions de l'eau dans le sol

### 2.2.1 Exprimée en pourcentage sur la base du sol sec (Ps)

$$P_s = \frac{\text{Poids de l'eau}}{\text{Poids du sol sec}} \times 100$$

ou

$$P_s = \frac{\text{PSH} - \text{PSS}}{\text{PSS}} \times 100 \quad (2.4)$$

où:

PSH = Poids de l'échantillon du sol humide

PSS = Poids de l'échantillon du sol sec.

### 2.2.2 La Teneur en eau exprimée en volume ( $\theta$ )

$$\theta = \frac{\text{Volume d'eau}}{\text{Volume de l'échantillon du sol}} = \frac{V_{\text{eau}}}{V_s} \quad (2.5)$$

$$\gamma_a = \frac{P_{ss}}{V_s} \longrightarrow V_s = \frac{P_{ss}}{\gamma_a} \quad (2.6)$$

$$\text{De l'équation 2.4 on a } P_{ss} = \frac{P_{\text{eau}}}{P_s} \quad (2.7)$$

Remplaçant l'équation 2.7 en 2.6 on a:

$$V_s = \frac{P_{\text{eau}}}{P_s \gamma_a} \quad (2.8)$$

Remplaçant l'expression 2.8 dans 2.5 on a :

$$\theta = \frac{\text{Volume d'eau}}{P \text{ eau}} P_s \gamma_a$$

$$\frac{\text{Volume d'eau}}{P \text{ eau}} = \frac{1}{\gamma_w}$$

alors

$$\theta = P_s \frac{\gamma_a}{\gamma_w} \quad (2.9)$$

où :

$V \text{ eau} =$  Volume d'eau

$V_s =$  Volume de l'échantillon du sol

$\gamma_a =$  Poids spécifique apparente du sol

$\gamma_w =$  Poids spécifique de l'eau

L'expression 2.9 pour la teneur volumique de l'eau est une fraction qui peut être exprimée en pourcentage ou en tant que fraction volumique  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ . Cela signifie un volume d'eau dans un volume de sol.

Si dans l'expression 2.9, on admet que le poids spécifique de l'eau varie très peu avec la température, et  $\gamma_w$  est égale à l'unité, on peut l'écrire

$$\theta = P_s \gamma_a$$

### 2.2.3 Hauteur ou lame d'eau

Dans les études sur les bilans d'eau et d'irrigation, on exprime la quantité d'eau en lame d'eau laquelle est obtenue par l'expression

$$h = \theta \cdot z = \frac{P_s \times \gamma_a}{100} \cdot z$$

où:

$\theta$  = Fraction volumique de l'eau,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

$z$  = Profondeur considérée, en m

$P_s$  = Pourcentage d'humidité sur la base du sol sec

$h$  = Lamé d'eau, en m.



2.2.4 **Lame ou hauteur d'irrigation**

C'est la quantité d'eau exprimée en hauteur au lame uniformément répartie sur une superficie donnée laquelle est calculée à partir de l'équation 2.10. C'est la lame d'eau qu'il faut appliquer pour remettre au sol l'humidité qui a été perdue. La lame d'eau dépend des caractéristiques physico-hydriques du sol. La lame brute d'application dépend des caractéristiques du sol et de l'efficacité de la méthode d'application de l'eau.

Pour déterminer la lame d'eau, il faut calculer la teneur en eau retenue par le sol entre deux niveaux qui sont connus comme la capacité au champ et le point de flétrissement entre lesquels l'eau est disponible pour être utilisée par les plantes.

La lame utilisable pour les plantes est calculée par:

$$h = \frac{(P_{scc} - P_{spf})}{100} \times a \times z \quad (2.11)$$

où:

$P_{scc}$  = Pourcentage d'humidité par rapport au poids sec de l'échantillon retenue par le sol à la capacité au champ (1/10 bar pour les sols sablonneux et 1/3 de bar pour les sols argileux).

$P_{spf}$  = Pourcentage d'humidité par rapport au poids sec de l'échantillon retenue par le sol au point de flétrissement (15 bars). La lame de remission est:

$$L_r = f \times h. \quad (2.12)$$

où:

$f$  = Le niveau choisi pour l'application de l'eau. Il est déterminé à partir de l'effet de l'humidité sur la productivité de la culture. Ainsi  $f$  prend les valeurs de 1 (La teneur en eau du sol se trouve au

point de flétrissement) et 0,6 (on remet 60% de la lame d'eau retenue entre la capacité au champ et le point de flétrissement).

La lame brute ou d'application ( $L_b$ ) est calculée par:

$$L_b = \frac{L_r}{\text{Efficacité d'application}} \quad (2.13)$$

### 2.2.5 Exemples conceptuels

Les données physico-hydrauliques d'un sol sablonneux sont les suivantes:

Profondeur cm	Poids spécifique Apparente	Teneur en eau (%)	
		1/10 bar.	15 bars.
0 - 30	1.56	9	2,44
30 - 60	1.52	9,48	3,71
60 - 100	1.53	10,32	3,87
100 - 120	1.54	10,32	4,48

A partir de cette information calculer:

- La teneur en eau volumétrique à la capacité au champ de la couche de sol entre 60 et 90 cm.
- La lame d'eau retenue dans le sol à 15 bars dans la couche de 0 à 30 cm.
- La lame d'eau retenue dans le profil du sol de 120 cm de profondeur entre 1/10 de bar et 15 bars.
- La lame d'eau à remettre lorsque la teneur en eau du sol arrive à 6,5% de l'humidité exprimée sur la base du poids sec de l'échantillon pour une culture de 0,60 m de profondeur effective des racines.
- La lame brute d'irrigation pour une culture de 0,30 m de profondeur effective des racines, lorsque le sol arrive

au niveau de 60% de l'humidité utilisable et l'efficacité d'application de l'irrigation est de 45%.

### Calculs

a) A partir de l'équation 2.9 et des données fournies on a:

Teneur en eau à la capacité au champ 10,32%.

Poids spécifique apparent 1,53 gr/cm<sup>3</sup>

$$\theta = P_s \gamma_a = 10,32 \times 1,53 = 15,8\% \text{ ou } 15,8 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

b) A partir de l'équation 2.10 on a:

$$h = \theta \times z = \frac{P_s \times \gamma_a}{100} \cdot z$$

$$h = \frac{2,44 \times 1,56}{100} \times 30 = 1,14 \text{ cm} = 11,4 \text{ mm.}$$

c)  $P_s = P_{s_{1/10}} - P_{s_{15}} =$

Pour:

$$h_{0-30} = \frac{9 - 2,44}{100} \times 1,56 \times 30 = 3,07 \text{ cm.}$$

$$h_{30-60} = \frac{9,48 - 3,71}{10} \times 1,52 \times 30 = 2,63 \text{ cm.}$$

$$h_{60-100} = \frac{10,32 - 3,89}{100} \times 1,53 \times 30 = 3,94 \text{ cm.}$$

$$h_{100-120} = \frac{10,32 - 4,48}{100} \times 1,54 \times 20 = 1,80 \text{ cm.}$$

$$h_0 - 120 = 11,44 \text{ cm.}$$

- d) A partir de l'équation 2.10 et les valeurs moyennes de rétention à 1/10 bar pour la couche de 0.6 m.

La valeur moyenne de la rétention à la capacité au champ

$$\frac{9 + 9,48}{2} = 9,24 \%$$

Valeur moyenne du poids spécifique apparent

$$\frac{1,56 + 1,52}{2} = 1,54 \text{ gr/cm}^3$$

$$L_r = \frac{9,24 - 6,5}{100} \times 1,54 \times 60 = 2,53 \text{ cm (25,8 mm)}$$

- e) A partir de l'équation 2.11 on calcule la lame d'eau retenue.

$$h = \frac{9 - 2,44}{100} \times 1,56 \times 0,30 = 3,07 \text{ cm}$$

$$L_r = 0,4 \times 3,07 = 1,23 \text{ cm}$$

$$L_6 = \frac{1,23}{0,45} = 2,73 \text{ cm.}$$

### 3 L'hydraulique de l'eau dans le sol

La thermodynamique de l'eau dans le système: sol-plante, exprime l'énergie de l'eau en termes du potentiel de l'eau.

Le niveau d'énergie de l'eau dans un point du profil du sol est exprimé en termes de la charge hydraulique. Le sol est un milieu poreux composé de capillaires de différents diamètres et

longueurs. En établissant une similitude entre l'écoulement dans les capillaires et l'écoulement dans les tuyaux le principe de Bernoulli s'écrit:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + H \quad (2.11)$$

où:

$z_1$  et  $z_2$  sont les élévations ou côtes des points 1 et 2

$\frac{P_1}{\rho g}$  et  $\frac{P_2}{\rho g}$  sont les niveaux piézométriques ou énergies de pressions des points 1 et 2

$\frac{v_1^2}{2g}$  et  $\frac{v_2^2}{2g}$  sont les énergies cinétiques des points 1 et 2

$H$  est la transformation d'énergie ou pertes de charge.

Dans le cas de l'écoulement dans le sol la vitesse est très faible de telle manière que l'on peut négliger les termes d'énergie cinétique. Sous cette hypothèse l'équation 2.11 s'écrit:

$$H = \left( \frac{P_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left( \frac{P_2}{\rho g} + z_2 \right) \quad (2.12)$$

$$H = \left( \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \right) + (z_1 - z_2) \quad (2.13)$$

En général on peut écrire:

$$H = h_p + h_g$$

où:

$H$  = charge hydraulique

hg = Charge de position ou gravitationnelle  
 hp = Charge de pression

D'après la figure II.27, la définition des termes est la suivante:

- h (charge hydraulique): Élévation de l'eau dans un tuyau ouvert, lequel est mis en contact avec un point du système sol-eau, s'exprime en cm.
- hg (Charge gravitationnelle): Élévation du point considéré au-dessus du plan de référence, s'exprime en cm.
- hp (Charge de pression): Élévation de l'eau dans le tuyau ouvert au dessus du point considéré, s'exprime en cm.

## 2.4 Exemples conceptuels.

### 2.4.1 Charge hydraulique dans un tensiomètre d'Investigation

Dans la figure II.28 on montre un schéma du tensiomètre de recherche placé sur le terrain. Le potentiel matriciel du sol (point A), exprimé en unités de charge hydraulique est:

$$\psi_{ma} = - (13,6h - (h + h_1 + h_2)) \quad 2.15$$

où:

$\psi_{ma}$  = Potentiel matriciel dans le point A (exprimé en cm d'eau).

h = Hauteur de mercure, en cm.

$h_1$  = Distance de la côte de référence (Superficie du sol) à la superficie du mercure dans le récipient.

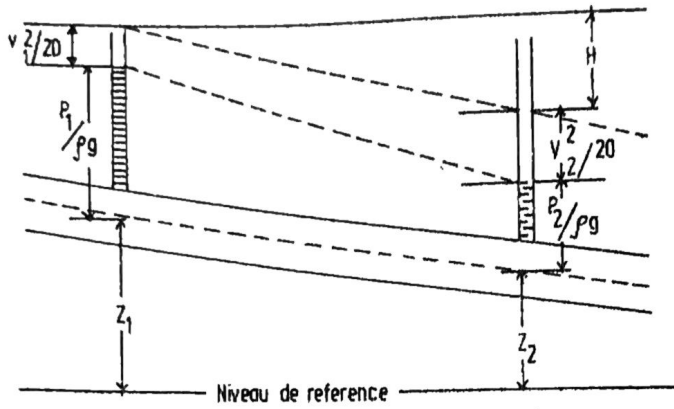


Fig. II . 26 Schema qui montre les termes du théorème de Bernoulli appliqué à l'écoulement de l'eau dans les tuyaux

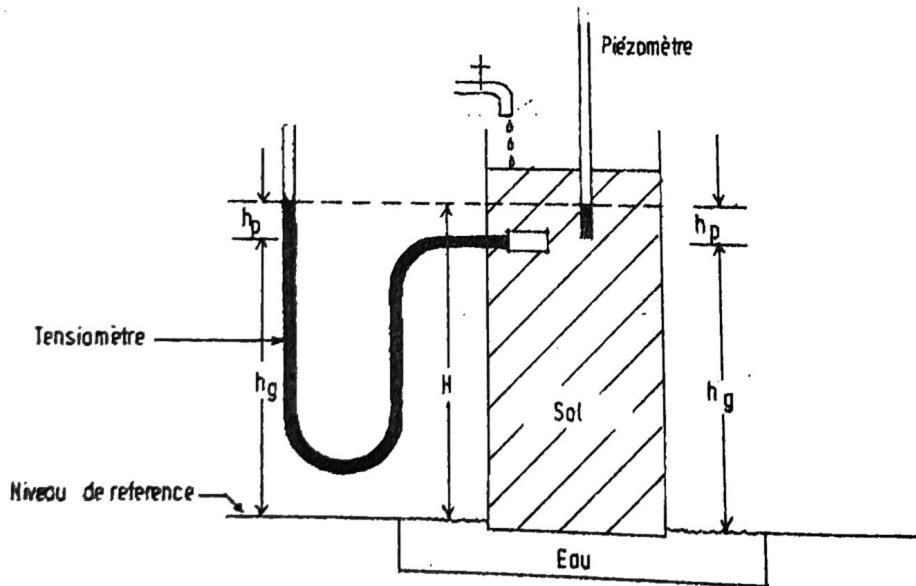


Fig.II. 27 Schema qui montre les composantes de la charge hydraulique dans le cas du piézomètre et du tensiomètre

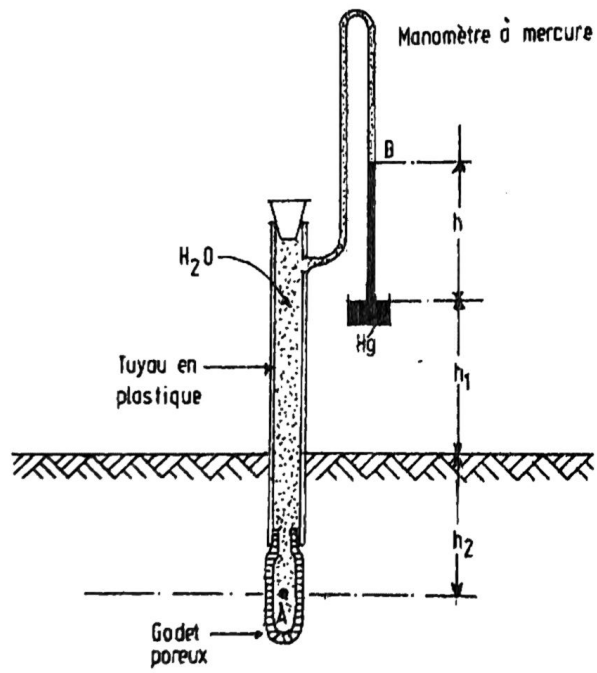


Fig.II 28-Schema d'un tensiomètre de recherche.



$h_2$  = Profondeur de l'emplacement du godet poreux

On est intéressé à déterminer la tension dans le point A, compte tenu que la lecture de la hauteur de mercure correspond à la tension sur le point B, pour obtenir la charge en A il est nécessaire de retrancher la charge équivalente à la colonne d'eau entre B et A. Soit  $(h + h_1 + h_2)$ . En tenant compte que la charge hydraulique s'exprime par:

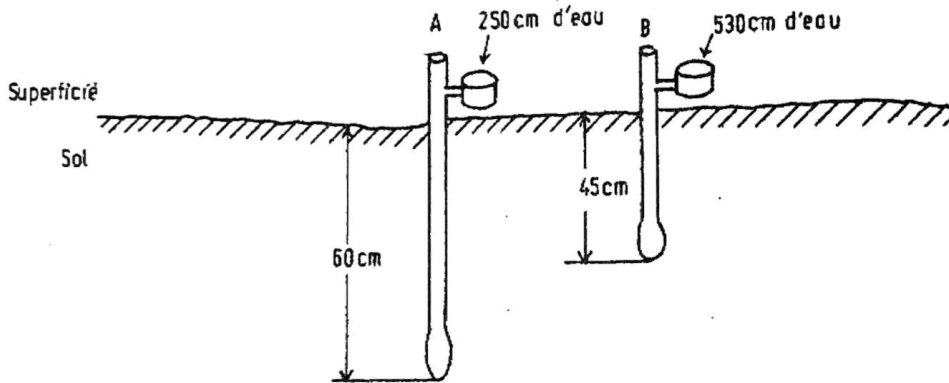
$$H = h_p + h_g$$

Dans le cas du tensiomètre on a:

$$\begin{aligned} H &= - (13,6 h - h - h_1 - h_2) - h_2 = h + h_1 - 13,6 h \\ &= h_1 - 12,6h. \end{aligned}$$

#### 2.4.2 Charges hydrauliques dans les tensiomètres commerciaux

Dans le schéma ci-après déterminé les charges hydrauliques des tensiomètres A et B ainsi que la différence de la charge entr'eux. La cote de référence est la surface du sol et après l'extrémité du tensiomètre A. Dans ce cas les lectures des vacuomètres donnent des valeurs de potentiel matiel ou charge de pression (suction).



Niveau de référence: La surface du sol

$$hg_A = -60 \text{ cm}$$

$$hg_B = -45 \text{ cm}$$

$$hp_A = -250 \text{ cm}$$

$$hp_B = -530 \text{ cm}$$

$$H_A = -310 \text{ cm}$$

$$H_B = -575 \text{ cm}$$

$$H = H_B - H_A = -575 - (-310) = -575 + 310 = -265 \text{ cm}$$

Niveau de référence: Extrémité du tensiomètre A

$$hg_A = 0$$

$$hg_B = 15 \text{ cm}$$

$$hp_A = -250 \text{ cm}$$

$$hp_B = -530 \text{ cm}$$

$$H_A = -250 \text{ cm}$$

$$H_B = -515 \text{ cm}$$

$$H = H_B - H_A = -515 - (-250) = -515 + 250 = -265 \text{ cm}$$

A partir des résultats, on déduit que l'on peut choisir n'importe quel niveau de référence. Lorsqu'il faut comparer les valeurs de la charge il faut considérer le même niveau de référence.

## BIBLIOGRAPHIE

- BARRS, H. D. 1968. Determination of water deficits in plant tissues, p. 355-368. IN: T. Kozlowski (ed.) Water deficits and plant growth. I. Development, control and measurement. Academic Press, New York.
- BLACK, T.A., W.R. GARDNER AND G.W. THURTELL. 1969. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. Agronomy Journal 33 (5):655-660.
- BOODT, M. DE, R. HARTMANN and P. DE MEESTER. 1967. Determination of soil-moisture characteristics for irrigation purposes by neutron-moisture meter and air-purged tensiometers. IAEA (ed.) Publication. pp. 147-160. Vienna, IAEA.
- BQX, J.E. Jr. 1965. Design and calibration of a thermocouple psychrometer which uses the Peltier effect. IN: A. Wexler (ed.) Humidity and moisture. Reinhold Publishing Corp., New York. p. 110-121.
- CAMPBELL, G.S., J.W. TRULL, AND W. H. GARDNER. 1968. A welding technique for Peltier thermocouple psychrometers, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32 (6):887-889.
- DALTON, F.N. and S. L. RAWLINS, 1968. Design criteria for Peltier-effect thermocouple psychrometers. Soil Sci. 105 (1):12-17.
- EHLIG, C.F. 1962. Measurement of energy status of water in plants with a thermocouple psychrometer. Plant Phys. 37 (3):288-290.
- GARDNER, W.H. 1965. Water content. IN: C.A. Black et al. (ed.), Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison. Wis., American Society of Agronomy. pp. 82-127.
- GARDNER, W.H. and C. CALISSENDORFF. 1967. Gamma-ray and neutron attenuation in measurement of soil bulk density and water content. IN: IAEA (ed.), Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. pp 101-113. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- HOFFMAN, G.J. AND W.E. SPLINTER. 1968. Instrumentation for measuring water potential of an intact plant-soil system. Trans. Amer. Soc. Agr. Engrs. 11:38-40.
- HOFFMAN, G.J. AND W. N. HERKELRATH. 1968. Design feature of intact leaf thermocouple psychrometer for measuring water potential. Trans. Amer. Soc. Agr. Engrs. 11:631-634.
- HOMES, J.W., S.A. TAYLOR and S.J. RICHARDS. 1967. Measurement of soil water. pp 275-303. IN: R.M. Hagan et al. (ed.) Irrigation of Agricultural Lands. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. (Monograph 11).

- KING, L.G. 1967. Gamma-ray attenuation for soil-water content measurements using  $^{241}\text{Am}$ . IN: IAEA (ed.), Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. pp. 17-29, Vienna, International Atomic Energy Agency.
- KIRKHAM, D. AND J.C. COREY. 1973. Recent progress in the design of radiation equipment and its practical implications. pp. 17 - 39. IN: IAEA, (ed), Soil-Moisture and Irrigation Studies II, Proceedings of a panel held in Vienna, 1973.
- LAMBERT, JOHN. 1970. Studies of water removal by weeds from pine plantations. Madison, Wisconsin Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. 90 p. (Ph.D. Thesis).
- LANG, A.R. G. 1967. Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solutions from 0 to 40 degrees C. Aust. J. Chem. 20:2017-2023.
- MANDHAR, M.S. 1966. Measurement of the water potential of intact plant tissues. I. Design of a microthermocouple psychrometer. J. Exp. Bot. 17(50):44-50.
- McHENRY, J.R. AND A.C. GILL. 1967. The influence of bulk density, slow neutron absorbers, and time on the calibration of neutron-moisture probes. IN: IAEA (ed.), Isotope and irrigation studies. pp. 83-99. Vienna. International Atomic Energy Agency.
- MERRILL, S.D. 1968. Details of construction of a multipurpose thermocouple psychrometer. Research report No. 115 U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California. 9 p.
- MILLAR, A.A. 1967. Internal water balance of barley in relation to moisture stress and environmental conditions. Fargo, North Dakota, North Dakota State University. 104 p.
- MILLAR, A. A., A.R.G. LANG AND W.R. GARDNER. 1969. Four-terminal Peltier type thermocouple psychrometer for measuring water potential in nonisothermal systems. Agron. J.62:705-708.
- MILLAR, A.A. 1971. Water balance of a natural site in the Lake Wingra Basin. Report to the International Biological Program, National Science Foundation. Madison, Wisconsin, Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. 11 p. (Biome Abstract 2 (1):423, 1972).
- MILLAR, A.A., W. R. GARDNER AND G. WEISS. 1970. Water regime of a sandy soil under row crops. Madison, Wisconsin, Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. 11 p. (Chapter I, Ph.D. Thesis of A. A. Millar).

- MILLAR, A.A. 1971. Descripción, construcción, calibración y uso de psicrómetros de termocuplas para determinar el potencial de agua en el sistema suelo-planta. Lima, Perú. Anales del IV Simposio Latinoamericano de Fisiología Vegetal 20 p.
- MILLAR, B.D. 1971. Improved thermocouple psychrometer for the measurement of plant and soil water potential. I. Thermocouple psychrometer and an improved instrument design. J. Exp. Bot 22:875-891.
- MONTEITH, J.L. AND P.C. OWEN. 1958. A thermocouple method for measuring relative humidity in the range 95-100%. J. Sci. Instrum. 35:433-446.
- NEUMAN, H.H. and S.W. THURTELL. 1972. A Peltier cooled thermocouple dew-point hygrometer for in situ measurements of water potential. IN: R.W. Brown and B.P. Van Haveren, eds. Psychrometry in water relations research. Utah Agr. Exp. Sta., Utah State University, Logan Utah.
- NEUMAN, H.H., G.W. THURTELL, K.R. STEVENSON and C.L. BEADLE. 1974. Leaf water content and potential in corn, sorghum, soybean, and sunflower. Can. J. Plant Sci. 54:185-195.
- PECK, A.J. AND R. M. RABBIDGE. 1969. Design and performance of an Osmotic tensiometer for measuring capillary potential. Soil Science Society of America. Proceedings 33(2):196-202.
- PHENE, C.J., G.J. HOFFMAN AND S.L. RAWLINS, 1971. Measuring soil matrix potential "in situ" by sensing heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction. Soil Science Society of America Proceedings 35 (1):27-33.
- RAWLINS, S.L. AND F.N. DALTON. 1967. Psychrometric measurement of soil water potential without precise temperature control. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 31(3):297-301.
- RAWLINS, S.L. 1966. Theory for thermocouple psychrometers used to measure water potential in soil and plant samples. Ag. Meteorol. 3:297-310.
- RICHARDS, L.A. AND G. OGATA. 1958. Thermocouple for vapor pressure measurements in biological and soil systems at high humidity. Science 128(3331):1089-1090.
- SPANNER, D.C. 1951. The Peltier effect and its use in measurement of suction pressure. J. Exp. Bot. 2:145-168.
- TAYLOR, S.A., D.D. EVANS AND W.D. KEMPER. 1961. Evaluating soil water. Logan, Utah Agricultural Experiment Station. 67 p. (Bulletin 426).
- VAN BAVEL, C.H.M., N. UNDERWOOD and R.W. SWANSON. 1956. Soil moisture measurement by neutron moderation. Soil Science 82(1):29-41.

DOCUMENTO  
MICROFILMADO

Fecha: 21 OCT 1986