

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

---

CENTRE DE BRAZZAVILLE

METHODE THERMODYNAMIQUE DE MESURE  
DE L'HUMIDITE DES SOLS

---

par

Bernard POUYAUD

SERVICE HYDROLOGIQUE

SEPTEMBRE 1969

## S O M M A I R E

Nous proposons dans cette note une méthode originale de détermination de l'humidité  $u$  d'un sol par la mesure de la capacité calorifique volumique  $C_u$  de ce sol.

$$\text{On a en effet } C_u = \rho_s \cdot \Gamma + u \quad (a)$$

$\rho_s$  : masse volumique de l'échantillon sec (constante)

$\Gamma$  : chaleur spécifique massique de l'échantillon sec (constante)

La mesure de  $C_u$  est faite de la façon suivante :

Nous avons démontré dans une note précédente que l'élévation de température maximale  $\theta_{\max}$ , provoquée par une perturbation thermique, produite par le passage d'un flux  $\Phi_0$  (watts/cm), durant l'intervalle de temps  $\Delta t$ , dans une résistance chauffante était à la distance  $r$  :

$$\theta_{\max} = \frac{\alpha}{C_u} \quad (b) \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{\Phi_0 \cdot \Delta t}{\pi \cdot e} \cdot \frac{1}{r^2} \quad \text{dans le cas cylindrique.}$$

Nous déduisons des relations (a) et (b)

$$u = \frac{\alpha}{\theta_{\max}} - \rho_s \cdot \Gamma$$

La note en question développe l'utilisation pratique qui peut être faite de cette relation simple.

## I N T R O D U C T I O N

---

### RAPPEL DE QUELQUES RESULTATS THERMODYNAMIQUES IMPORTANTS

Une note précédente nous a déjà permis d'établir les "lois de la progression d'une perturbation thermique en milieu isotrope".

Nous rappelons ci-après les résultats importants que nous allons utiliser dans la suite.

Nous avons traité le cas d'une perturbation produite par l'apparition d'un flux  $\Phi_0$  pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$ .

Deux cas géométriques étaient envisagés :

- le cas cylindrique, où  $\Phi_0$  apparaît réparti sur un axe.  
 $\Phi_0$  s'exprime alors en watts/cm.

- le cas sphérique, où  $\Phi_0$  apparaît ponctuellement.  
 $\Phi_0$  s'exprime simplement en watts.

soit : .  $\theta_{r,t}$  la température à l'instant  $t$  d'un point situé à distance  $r$  de la source  $\Phi_0$

.  $K$  la conductibilité thermique du milieu en watts  $\text{cm}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$

.  $C$  la capacité thermique volumique Joules/cm<sup>3</sup>

.  $a$  la diffusivité thermique du milieu en cm<sup>2</sup>/s

.  $t_{s,r}$  l'instant où la température en un point situé à la distance  $r$  de la source  $\Phi_0$ , passe par un maximum

.  $\theta_{\text{max},r}$  ce maximum de température en question.

Nous obtenons :

cas cylindrique :

$$\vartheta_{r,t} \approx \frac{\phi_0 \cdot \Delta t}{4n \cdot K} \cdot \frac{e^{-\frac{r^2}{4at}}}{t} \quad (1)$$

$$t_{s,r} \approx \frac{r^2}{4a} \quad (2)$$

$$\vartheta_{\max,r} \approx \frac{\phi_0 \cdot \Delta t}{\pi \cdot e} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (3)$$

cas sphérique :

$$\vartheta_{r,t} \approx \frac{\phi_0 \cdot \Delta t}{8n \cdot K \cdot r} \cdot \frac{e^{-\frac{r^2}{4at}}}{t} \quad (1')$$

$$t_{s,r} \approx \frac{r^2}{4a} \quad (2')$$

$$\vartheta_{\max,r} \approx \frac{\phi_0 \cdot \Delta t}{2n \cdot e} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{r^3} \quad (3')$$

## I.- DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE EXPERIMENTAL UTILISE.-

Afin de pouvoir vérifier ces théories, nous avons réalisé de toutes pièces un appareillage de mesure.

Il comprend :

- une source chaude constituée par une résistance ;
- des tiges de mesure de la température équipées de thermocouples ;
- un millivoltmètre pour mesurer les différences de potentiels apparues aux bornes des thermocouples.

### 1) Résistance chauffante.

Cette résistance (voir schéma I1) est constituée d'un fil résistant en constantan bobiné pour assurer la rigidité de l'ensemble sur un câble conducteur support isolé par de l'amiante. La partie chauffante se présente sous la forme d'un solénoïde long de 5 cm et épais de 1mm. Elle est montée au bout d'une tige rigide de 10 cm permettant de l'enfoncer dans le sol. La résistance est d'environ  $2 \Omega$  ; dans les conditions d'utilisation, elle fournit environ 30 W, soit  $\Phi_0 = 6$  watts/cm.

### 2) Tiges de mesures de la température..

Les variations de température au sein du milieu utilisé sont mesurées grâce à des thermocouples. L'une des soudures du thermocouple est maintenue à une température constante. L'autre soudure est placée à l'extrémité d'une tige de mesure constituée d'un tube creux de faible diamètre afin de perturber le moins possible le milieu (1 à 2 mm). Ces tiges sont longues de 10 à 20cm.

3) Mesure des grandeurs électriques produites.:

Les différences de potentiel observées sont mesurées sur un millipotentiomètre MECI, ou injectées à un enregistreur MECI permettant de suivre la courbe de chauffe du point considéré.

4) Ordre de grandeur.

Afin de perturber le moins possible l'équilibre phase liquide - phase vapeur du milieu étudié, nous avons limité l'élévation maximale de température  $\theta_{\max}$  à l'ordre du °C.

Avec la résistance utilisée cela conduit à choisir une distance de mesure  $r$  d'environ 2 cm, et des durées de chauffe  $\Delta t$  de l'ordre de 20 à 50".

II.- VERIFICATIONS EXPERIMENTALES DES FORMULES THEORIQUES ETABLIES

Un premier appareil que nous décrirons plus loin a été placé "in situ" sur le flanc d'une tranchée, donc en sol non remanié.

- la résistance, du modèle précédemment décrit, est enfoncée de 15 cm
- les points de mesure situés dans le plan équatorial de la résistance sont à 12,5 cm de la paroi de la tranchée et disposés comme suit :
  - 2 thermocouples en série à 2 cm de la résistance
  - 3 thermocouples en série à 3,5 cm de la résistance
  - 4 thermocouples en série à 5 cm de la résistance

L'appareil ainsi installé concerne une sphère de terrain de 5 cm de rayon que nous pouvons raisonnablement supposée non perturbée par les effets de bord dûs à la proximité de la paroi de la tranchée.

1) Résultats.

Deux séries d'expériences ont été menées à bien pour deux états d'humectation.

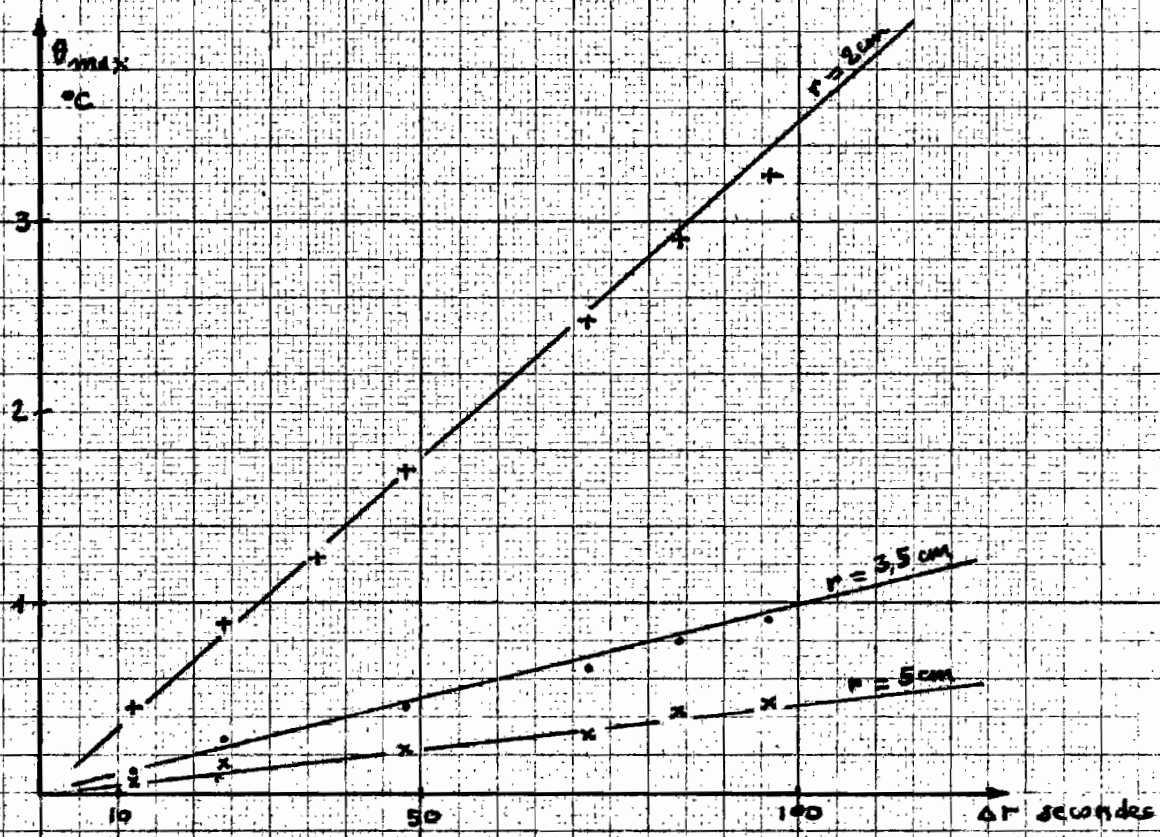
Les tableaux de résultats suivants vont nous permettre de vérifier les équations (1), (2) et (3).

Etat d'humectation n° 1

Nombre d'observat.	$\Delta t$	$\vartheta_{\max(2)}$	$\vartheta_{\max(3,5)}$	$\vartheta_{\max(5)}$	$t_s(2)$	$t_s(3,5)$	$t_s(5)$
6	48 "	2,02	0,545	0,250	1,1	2,9	5,0

Etat d'humectation n° 2

Nombre d'observat.	$\Delta t$	$\vartheta(2)$	$\vartheta(3,5)$	$\vartheta(5)$	$t_s(2)$	$t_s(3,5)$	$t_s(5)$
8	48 "	1,70	0,442	0,220	1,1	2,8	5,0
1	12 "	0,450	0,111	0,067	1,0	2,5	4,0
1	24 "	0,885	0,289	0,167	1,0	2,9	5,0
1	36 "	1,23	-	-	1,1	2,5	4,0
1	72 "	2,48	0,644	0,308	1,3	2,8	5,3
1	84 "	2,90	0,800	0,433	1,25	3,1	5,4
1	96 "	3,24	0,91	0,467	1,3	3,1	5,4



RELATIONS  $\theta_{max, r} = f(\Delta t)$



Il est évidemment très difficile de déterminer les  $t_s$  (3,5) et  $t_s$  (5) car les courbes sont très aplaties, et le maximum difficile à définir.

De même les  $\theta_{\max}$  (3,5) et (5) sont délicats à déterminer, car on ne sait jamais si pour les durées nécessaires à l'expérience, le corps demeure en état thermique stable.

## 2) Utilisation de ces résultats.

### a) Relation entre $\theta_{\max,r}$ et $\Delta t$ à $r$ constant.

La relation entre  $\theta_{\max,r}$  et  $\Delta t$  est linéaire. Cependant pour les fortes valeurs de  $\Delta t$ , les valeurs de  $\theta_{\max}$  observées sont inférieures à ce qu'elles devraient théoriquement être. Cela est dû à ce que nous ne sommes plus dans le cas des approximations faites,  $\Delta t$  est alors trop grand.  $\theta_{\max,r} = A \cdot \Delta t$

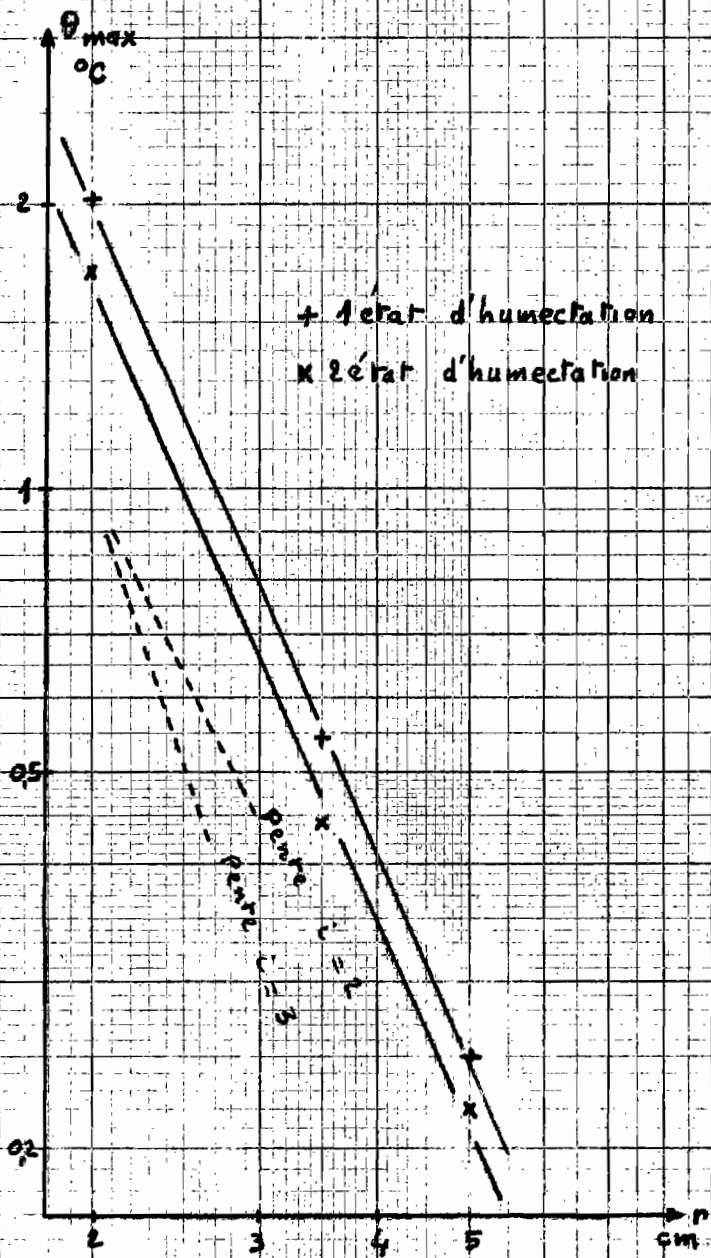
### b) Relation entre $\theta_{\max,r}$ et $r$ .

Traçons pour les deux états d'humectation, dans le cas  $t = 48$  " où nous avons fait le plus d'observations  $\text{Log}(\theta_{\max})$  en fonction de  $\text{Log}(r)$ .

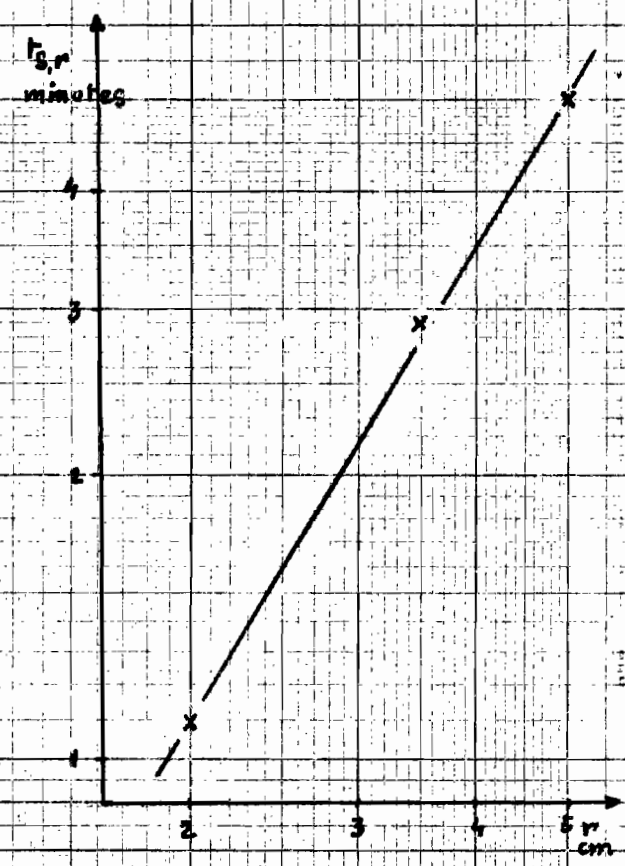
Nous trouvons en papier Log Log un bon alignement des trois points correspondant aux distances 2 cm, 3,5 cm et 5 cm.

La pente permet de préciser l'exposant de la relation pour les valeurs de  $r$  comprises entre 2 et 5 cm /  $\theta_{\max,r} = \frac{B}{r^{2,3}}$

Nous sommes donc en fait dans un cas intermédiaire des cas cylindriques et sphériques décrits.



RELATION  $\theta_{max} = f(r)$



RELATION  $t_{s,r} = f(r)$

Les isothermes sont des ellipsoïdes au lieu d'être des cylindres ou des sphères dont les foyers sont situés aux deux extrémités de la résistance chauffante d'où l'exposant 2,3 au lieu de 2 ou 3.

c) Relation entre  $t_s$  et  $r$ .

$$\text{Traçons } \text{Log } (t_s, r) = f(\text{Log } (r))$$

Nous trouvons sur papier Log Log 3 points alignés, la pente de la droite nous fournit l'exposant soit :

$$t_{s,r} \equiv C \cdot r^{1,67}$$

l'exposant est donc 1,67 et non 2 pour les valeurs de  $r$  comprises entre 2 et 5 cm.

Remarque 1 :

Nous savons par ailleurs que dans le cas d'une perturbation produite par une mise à une température  $\vartheta_0$  constante de la source chaude pendant le temps  $\Delta t$ , nous avons  $t_{s,v} = C' \cdot r$ .

Nous avons démontré dans le cas  $\phi_0$  constant  $t_{s,r} = C'' \cdot r^2$

Il faut donc admettre que cette différence dans l'exposant vient de ce que le cas expérimental s'éloigne de la théorie. Ce qui est bien exact, puisque il est impossible de fournir un flux  $\phi_0$  constant pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$ . En fait le flux  $\phi_0$  fourni est déjà "étalé", et si la quantité de chaleur fournie pendant  $\Delta t$  est effectivement  $\phi_0 \cdot \Delta t$ , elle produit un  $\vartheta_{\text{max}}$  égal à celui produit par un  $\phi'_0$  théorique tel que  $\phi'_0 = \lambda \cdot \phi_0$  avec  $\lambda < 1$ .

Donc dans les formules utilisées il conviendra de remplacer  $\Phi_0$  par  $\Phi'_0$ .  $\lambda$  sera déterminé par étalonnage pour chaque distance  $r$  et durée de chauffe  $\Delta t$ , car il est probable que  $\lambda$  dépend de l'ensemble des facteurs, géométriques et thermodynamiques.

Remarque 2 :

Nous avons déjà dit que nous sommes dans un cas ellipsoïdal, intermédiaire des cas cylindriques et sphériques étudiés. Cela n'a néanmoins aucune influence sur l'exposant  $i$  de la relation

$$t_{s,r} = C. r^i$$

En effet, dans un cas comme dans l'autre, nous avons démontré que  $i = 2$ , ce qui demeure donc vrai dans le cas ellipsoïdal intermédiaire, ce qui justifie la remarque 1.

Remarque 3 :

Il ne faut guère se leurrer sur la précision des valeurs numériques trouvées des exposants : 2,3 et 1,64.

En effet les distances  $r$  expérimentales ne sont pas connues très précisément, et le sol n'est pas non plus homogène.

Nous reviendrons ultérieurement sur l'interprétation mathématique de ces résultats.

### III.- APPLICATION A LA MESURE DE L'HUMIDITE D'UN SOL

On a depuis longtemps tenté de passer par le biais des caractéristiques thermiques des sols (conductivité, diffusivité, capacité) pour déterminer l'humidité des sols.

Toutes les méthodes utilisées ont le gros défaut de nécessiter une mise en chauffe importante du milieu, qui modifie considérablement l'équilibre phase vapeur - phase liquide du matériau. Ce qui au mieux rend la mesure non reproductible.

Les équations que nous avons exposées permettent de mesurer expérimentalement au choix l'une de ces trois caractéristiques sans élévation de température supérieure à 2°C à 2 cm de la source, donc sans modifier le corps, Des séries de plusieurs dizaines de cycles de mesure ont été faites pour s'assurer qu'il n'y avait ni perturbation du milieu ni effet d'hystérésis toujours possible.

Pour des raisons pratiques nous avons décidé d'utiliser la capacité thermique volumique  $C_u$  qui présente l'avantage de pouvoir être calculée pour un corps d'humidité  $u$ , si on connaît sa masse volumique, sa porosité, et sa capacité thermique massique

1) Variation de la capacité thermique volumique en fonction de l'humidité.

Soit  $C_u$  : la capacité thermique volumique du milieu d'humidité  $u$  en Cal/cm<sup>3</sup>

$C_s$  : la capacité thermique volumique du milieu sec ( $u=0$ ) en Cal/cm<sup>3</sup>

$\Gamma$  : la capacité thermique massique en Cal/g

$u$  : l'humidité :  $\frac{\text{volume d'eau}}{\text{unité de volume du corps}}$

$\rho_s$  : la masse volumique du milieu sec.

Nous supposons dans ce paragraphe que l'échantillon n'est pas modifié et conserve une porosité constante, quelle que soit son humidité, c'est-à-dire qu'il ne se tasse pas ou au contraire ne se dilate pas.

On a évidemment  $C_u = C_s + u$ , puisque la capacité thermique de l'eau est 1 cal/cm<sup>3</sup>.

On a de même  $C_s = \rho_s \cdot \Gamma$

donc  $C_u = \rho_s \cdot \Gamma + u$  et  $u = C_u - \rho_s \cdot \Gamma$

$C_u$  nous est fourni par l'expérience.

2) Détermination de  $C_u$  et de l'humidité  $u$ .

Nous avons vu que

$$\theta_{\max,r} = \frac{\alpha}{C_u}$$

soit 
$$\theta_{\max,r} = \frac{\alpha}{\rho_s \Gamma + u}$$

d'où 
$$u = \frac{\alpha}{\theta_{\max,r}} - \rho_s \cdot \Gamma$$

- $\rho_s$  et  $\Gamma$  sont mesurés une fois pour toutes sur un échantillon du sol en place
- $\theta_{\max,r}$  est mesuré sous la forme d'une différence de potentiel au millivoltmètre
- $\alpha$  peut être obtenu par étalonnage, mais nous pouvons aussi directement le calculer.

### 3) Description de l'appareil réalisé.

Nous décrivons ci-après un appareil dit "d'étalonnage", plus complexe et précis dans sa partie thermocouples que l'appareil placé in situ.

- a) source chauffante : il s'agit du modèle standardisé déjà décrit.
- b) points de mesure : six thermocouples, disposés au sommet d'un hexagone à 2 cm de l'axe de la résistance dans un plan équatorial, permettent de mesurer les variations de température produites à 2 cm de la résistance par l'établissement d'un flux  $\Phi_0$  pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$  au sein du matériau dont on veut mesurer l'humidité.  
La sensibilité est de 0,36 mV pour 1°C.
- c) enceinte de mesure : elle est constituée par un volume de 3,820 dm<sup>3</sup> qui peut être facilement pesé pour déterminer la masse volumique du matériau expérimenté.
- d) les différences de potentiel sont injectées sur un enregistreur MECI qui permet de mesurer facilement  $\mathcal{D}_{max}$ .

On pourrait fort bien en phase d'utilisation sur le terrain se contenter d'un millivoltmètre et lire  $\mathcal{D}_{max}$  au passage du maximum de potentiel.

#### IV.- RESULTATS EXPERIMENTAUX

Application de la méthode décrite dans le cas d'un sol sablo-limoneux de Brazzaville.

##### 1 - Détermination des caractéristiques physiques du matériau sec.

###### A - Capacité calorifique massique

A l'aide d'un calorimètre de fortune, constitué d'une simple bouteille thermos, nous avons obtenu, après plusieurs expériences sur divers échantillons du même sol, la valeur moyenne suivante

$$\Gamma = 0,22 \text{ cal/g}$$

###### B - Densité moyenne des grains solides constituant le sol considéré.

Par la méthode classique du flacon, nous avons obtenu la valeur moyenne :

$$\rho_{\text{solide}} = 2,49 \text{ g/cm}^3$$

##### 2 - Etalonnage de l'appareil.

Nous nous plaçons dans les conditions décrites :

- 6 thermocouples en série à 2 cm
- durée de chauffe  $t = 24$  secondes
- $\Phi_0$  constant = 29,4 watts pour 5cm de résistance.

L'enceinte de mesure est emplie par des échantillons du même sol d'humidités différentes.

L'humidité est mesurée par pesée.



Nous mélangeons à une masse connue de sol sec, une masse donnée d'eau. Nous connaissons alors précisément l'humidité d'une fraction de ce mélange.

Nous définissons les valeurs suivantes :

$P'_t$  : masse totale de l'échantillon (')

$P'_H$  : masse de l'eau contenue dans l'échantillon (')

$P'_s$  : masse de l'échantillon sec =  $P'_t - P'_H$

$V$  : volume de l'échantillon (') = 3,820 dm<sup>3</sup>

$u'$  : humidité de l'échantillon (') =  $\frac{P'_H}{V}$

$\theta'_{u}$  : le maximum de l'élévation de température atteint à une distance  $r = 2$  cm dans les conditions décrites.

$\rho'_s$  : masse volumique  $\frac{P'_s}{V}$  de l'échantillon (')

A - Retour à des caractéristiques morphologiques identiques.

Les différentes mesures faites le sont pour des échantillons de  $P_s$  et  $\rho_s$  variables dans des états de compacité différents.

Pour comparer ces résultats, nous devons ramener ces résultats à ceux qui seraient observés sur des échantillons d'humidité variable, ayant même caractère morphologique ( $\rho_s = \text{cst}$ ,  $P_s = \text{cst}$ ). Soit (") ces nouveaux états.

Nous avons entre l'état (') et l'état (") les relations suivantes :

$$\text{soit } \beta = \frac{P''_s}{P'_s}$$

il vient évidemment

$$P''_t = \beta \cdot P'_t$$

$$P''_H = \beta \cdot P'_H$$

$$u'' = \beta \cdot u'$$

et  $\rho''_s = \beta \cdot \rho'_s$

or  $\theta'_{u'} = \frac{\lambda}{C' u'}$  et  $\theta''_u = \frac{\lambda}{C'' u}$

$$\text{soit } \frac{\theta''_u}{\theta'_{u'}} = \frac{C' u'}{C'' u} = \frac{\rho'_s \cdot r + u'}{\rho''_s \cdot r + u''} = \frac{1}{\beta} \left( \frac{\rho'_s \cdot r + u'}{\rho'_s \cdot r + u'} \right)$$

$$\text{soit } \theta''_u = \frac{1}{\beta} \theta'_{u'}$$

Ces équations permettent de ramener les résultats expérimentaux à des résultats comparables obtenus avec un corps de mêmes caractéristiques morphologiques ( $\rho_s = \text{cst}$ ) ainsi que cela se passe "in situ".

B - Il est également possible de rendre comparable des résultats obtenus avec des résistances chauffantes différentes ( $\Phi_0$  différents), ou correspondant à des durées de chauffe différentes.

En effet, toutes choses égales par ailleurs, nous savons que :

$\theta_{\text{max}}$  est proportionnel à  $\Phi_0$

$\theta_{\text{max}}$  est proportionnel à  $\Delta t$

ainsi que l'ont vérifié les expériences précédentes.

C - Etalonnage proprement dit.

Nous effectuons l'expérience tout d'abord sur différents échantillons de sol sec de masse volumique  $\rho_s$  variable.

Puis l'expérience est pratiquée sur des sols d'humidité  $u$  croissante.

Nous avons réuni les résultats obtenus en un seul tableau

- les (') sont les résultats expérimentaux
- les (") sont les résultats précédent ramenés à un état morphologique de référence par les formules exposées dans le § B.

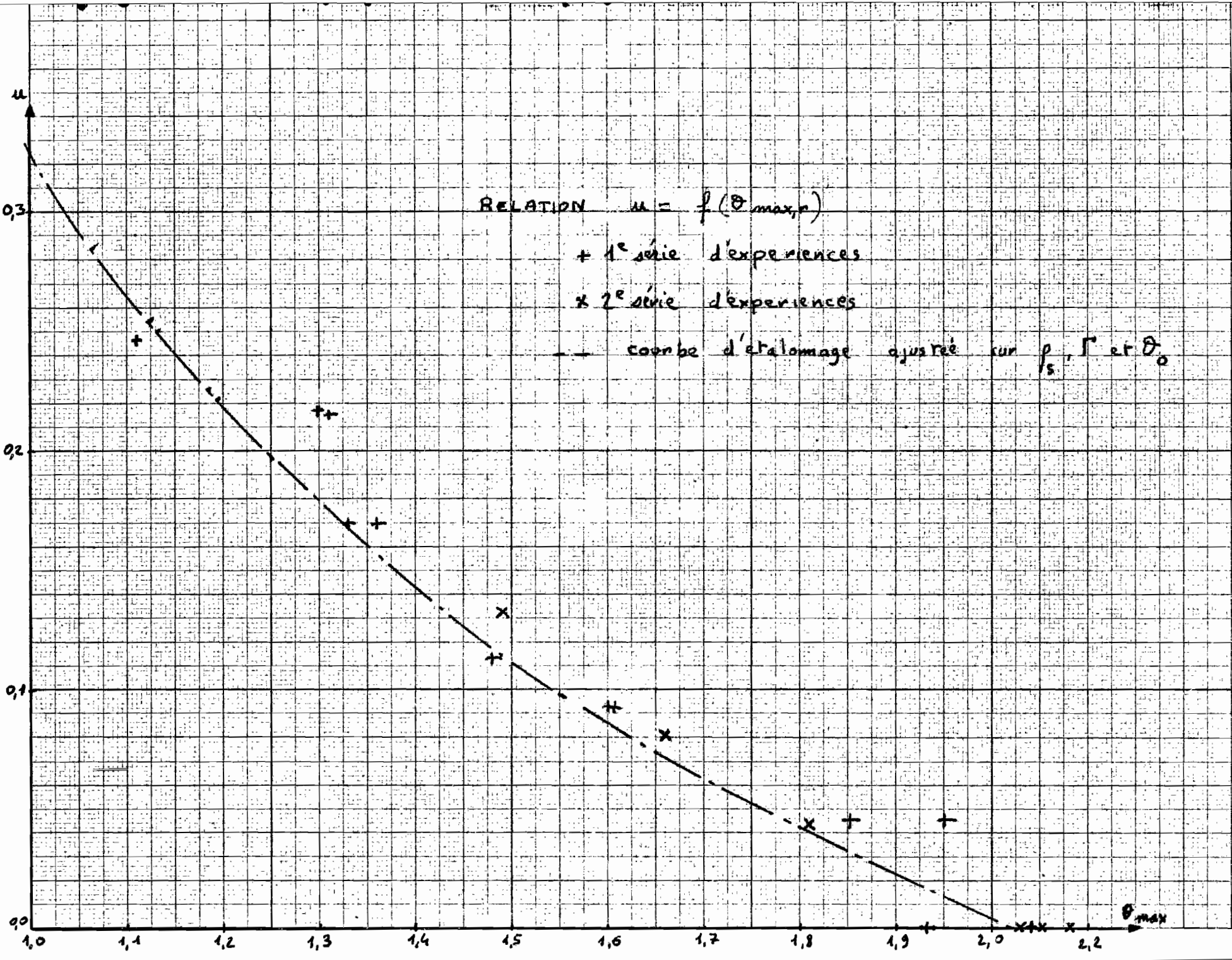
Nous avons choisi comme état de référence :

$$P''_s = 5500 \text{ g} \quad \text{soit} \quad \rho''_s = 1,44 \text{ g/cm}^3$$

N° expér.	$P'_s$ g	$\theta'_u$ °C	$u'$	$\theta''_u$ °C	$u''$
1	5019	2,19	0	1,93	0
2	5579	2,08	0	2,04	0
3	4870	2,28	0,039	1,95	0,046
4	5146	2,05	0,041	1,85	0,046
5	4684	1,94	0,076	1,60	0,092
6	5390	1,69	0,087	1,60	0,092
7	5423	1,55	0,108	1,48	0,114
8	6294	1,23	0,188	1,36	0,170
9	5590	1,30	0,167	1,28	0,170
10	6158	1,21	0,234	1,31	0,216
11	6249	1,18	0,238	1,30	0,217
12	5910	1,07	0,255	1,11	0,246
1'	5440	2,05	0	2,03	0
2'	4983	2,27	0	2,05	0
3'	5448	2,11	0	2,08	0
4'	4545	2,24	0,037	1,81	0,044
5'	4760	1,93	0,069	1,66	0,080
6'	5400	1,52	0,124	1,49	0,132

1ère série d'expériences

2ème série d'expériences



Nous avons reporté sur un graphique les points  $u''$ ,  $\theta''_u$

le  $\theta_{\max}$  moyen des sols secs est donc :

$$\theta_0 = 2,026^\circ\text{C} \text{ moyennes des expériences } 1,2,1',2',3'$$

$$\rho_s = 1,44 \text{ g/cm}^3 \quad \text{et} \quad \Gamma = 0,22 \text{ cal/g}$$

donc  $C_s = \rho_s \cdot \Gamma = 0,317 \text{ cal/cm}^3$  pour l'échantillon de référence.

Calcul de  $\alpha$  :

$$\text{Nous avons } u = \frac{\alpha}{\theta_{\max}} - \rho_s \cdot \Gamma$$

$$\text{pour } u = 0 \quad \theta_{\max} = \theta_0 = 2,026^\circ\text{C}$$

$$\text{soit } \alpha = \theta_0 \cdot \rho_s \cdot \Gamma = 0,642$$

la courbe d'étalonnage calculée avec  $\Gamma$ ,  $\rho_s$  et  $\theta_0$  est donc

$$u = \frac{0,642}{\theta_{\max}} - 0,317$$

soit

$\theta_{\max}$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$u$	0,325	0,218	0,142	0,084	0,040	0,004

qui s'ajuste bien sur les points expérimentaux.

Remarque 1 :

La méthode est en fait beaucoup plus précise que ne le laisserait présager l'examen de la courbe d'étalonnage.

La principale cause d'erreur des points expérimentaux de l'étalonnage consiste à réaliser dans les diverses expériences des conditions géométriques identiques ( $r=2\text{cm}$ ) ou à ramener les résultats aux conditions morphologiques de référence ( $\rho_s = \text{cst} = 1,44 \text{ g/cm}^3$ ).

Ces difficultés sont annulées dans les mesures "in situ" où la distance des points de mesure à la résistance reste fixe, et où le  $\rho_s$  reste évidemment constant.

De plus dans le cas "in situ", le sol n'est certes pas homogène morphologiquement, mais cette hétérogénéité reste la même lorsque  $u$  varie. Alors que hors de l'étalonnage, l'hétérogénéité des échantillons varie de l'un à l'autre.

Remarque 2 :

Il est particulièrement important d'injecter dans la résistance chauffante le même  $\phi_0$  pour chaque expérience. Nous avons eu quelques difficultés lors des premières expériences à obtenir une résistance constante et une puissance injectée constante.

Cela a pu être réalisé presque parfaitement grâce à des résistances isolées, sans sacrifier toutefois à l'inertie thermique de la résistance chauffante qui doit être la plus faible possible, ce qui ne laisse guère de latitude.

Remarque 2' :

On note également que les points expérimentaux correspondent souvent à des  $\rho$  plus forts qu'ils <sup>ne</sup> devraient être. Cela provient du fait qu'il est difficile de centrer parfaitement la résistance dans l'échantillon au milieu des 6 thermocouples ; l'erreur faite est alors une erreur par excès.

Remarque 3 :

Retour sur l'interprétation théorique.  
Nous avons déterminé expérimentalement

$$u \equiv \frac{0,642}{\theta_{\max}} - 0,317$$

dans les conditions :  $r = 2 \text{ cm}$   
 $\Delta t = 24 \text{ secondes}$   
 $\Phi_0 = 5,95 \text{ watts/cm}$

la théorie nous conduirait à :

$$\vartheta_{\max} = \frac{\Phi_0 \cdot \Delta t}{n \cdot e} \cdot \frac{1}{Cu} \cdot \frac{1}{r^2} \quad \text{dans le cas cylindrique.}$$

Les expériences destinées à la vérification de ces équations nous avaient conduits à admettre que nous étions dans un cas ellipsoïdal intermédiaire des cas sphériques et cylindriques tels que :

$$\vartheta_{\max} = \mu' \cdot \frac{\Phi_0 \cdot \Delta t}{n \cdot e} : \frac{1}{Cu} \cdot \frac{1}{r^i}$$

avec comme valeurs limites :

$$\begin{aligned} & ; \mu' = 1 \\ & \quad i = 2 \quad \text{cas cylindrique} \\ & \mu' = 0,5 \\ & \quad i = 3 \quad \text{cas sphérique} \end{aligned}$$

ce qui revient à dire que les  $\vartheta_{\max}$  varient de façon inversement proportionnelle au volume de l'isotherme considéré soit :

$$\begin{aligned} & \text{en } r^2 \quad \text{pour le cylindre} \\ & \quad r^3 \quad \text{pour la sphère,} \\ & \text{et } r^3 \left( \sqrt{1 + \frac{e^2}{r^2}} \right) \quad \text{pour l'ellipsoïde} \end{aligned}$$

$$\text{or } r^3 \sqrt{1 + \frac{e^2}{r^2}} \text{ varie comme } r^2 \text{ si } r \ll e$$

$$\text{et comme } r^3 \text{ si } r \gg e$$

e étant la demi distance des foyers de l'ellipsoïde, soit la demi longueur de la résistance.

Dans le cas expérimental réalisé, nous avons déterminé pour  $r = 2$  cm la valeur 2,3 pour  $i$ .

La courbe expérimentale  $u = \frac{0,642}{\max} - 0,317$  va nous permettre de calculer la valeur de  $\mu$  correspondante.

$$\mu = \frac{\theta_0 \cdot \rho_s \cdot \Gamma}{\Phi_0 \cdot \Delta t} \cdot \pi \cdot e \cdot r^{2,3}$$

d'où  $\mu = 0,79$ , sans dimension.  
dans le cas ellipsoïdal, pour  $r = 2$  cm

$$\mu = 0,79$$

$$i = 2,3$$

posons  $\eta = \frac{e}{r}$

Nous avons obtenu :

cas cylindrique	$\eta = \infty$	$\mu = 1$	$i = 2$
cas sphérique	$\eta = 0$	$\mu = 0,5$	$i = 3$
cas ellipsoïdal expérimenté $e = 2,5$ cm $r = 2$ cm	$\eta = 1,25$	$\mu = 0,79$	$i = 2,3$

Ce qui permet l'ébauche des lois  $\mu(\eta)$  et  $i(\eta)$

\* dans cette remarque 3, nous ne tenons pas compte des résultats auxquels nous avait conduit la remarque 1 du § II 2 c).

Nous supposons donc être dans le cas théorique où la résistance produit un flux  $\Phi_0$  constant pendant la durée de chauffe  $\Delta t$ .



## C O N C L U S I O N

Nous proposons donc la méthodologie suivante pour la mesur "in situ" de l'humidité des sols.

- a) Introduction dans le milieu d'une résistance chauffante : longueur 5 à 10 cm, résistance 2 à 3  $\Omega$  de façon à avoir un flux d'environ 6 watts/cm.
- b) Introduction d'une sonde à thermocouples de mesure à 2 cm de la résistance dans son plan équatorial.
- c) Durée de la chauffe 20° secondes environ, ce qui conduit à une élévation de température de 1 à 2 ° au point de mesure.

\* des expériences répétées ont prouvées que cette élévation de température ne perturbait pas l'humidité du milieu expérimenté.

- d) Prélèvement d'un volume donné du corps (1dm<sup>3</sup> par exemple).
- e) Détermination au labo du  $\rho_s^r$  de ce sol étuvé.
- f) Détermination au labo du  $\theta_o$  à 2 cm de ce sol étuvé.

ce qui permet de déterminer les coefficients A et B de l'équation d'étalonnage  $u = \frac{A}{\theta_{\max}} - B$

Par cette méthode on peut suivre, à raison d'une mesure toutes les 5 ou 10 minutes, les modifications de l'humidité dans une portion de sol de quelques cm de diamètre.

ANNEXE I

Si la détermination des seuls  $\theta_0$  et  $\rho_s$  sur l'échantillon étuvé ne paraît pas suffisante pour l'étalonnage, on peut le vérifier par des prélèvements d'échantillons du sol dans des états d'humectations différentes.

Soit  $u_1$  et  $\theta_1$  l'humidité et l'élévation de température obtenues pour un sol 1  
 $u_2$  et  $\theta_2$  pour un sol 2

Nous avons :

$$u_1 = \frac{A}{\theta_1} - B$$

$$u_2 = \frac{A}{\theta_2} - B$$

d'où on tire facilement :

$$A = \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot \frac{u_1 - u_2}{\theta_2 - \theta_1}$$

$$B = \frac{u_1 \theta_1 - u_2 \theta_2}{\theta_2 - \theta_1}$$

Cette seconde méthode d'étalonnage présente les inconvénients et les avantages suivants :

- Inconvénients :

Nécessite 2 prélèvements dans le milieu, plus ou moins représentatifs.

- Avantages :

Il n'est plus nécessaire de passer par le biais de l'appareil d'étalonnage. Il n'est même pas nécessaire de connaître exactement la distance  $r$  à laquelle la mesure est faite de la résistance, pas plus que le flux  $\Phi_0$  où le temps  $\Delta t$  pourvu qu'ils demeurent constants.