**ORSTOM**
Institut Français de Recherche
Scientifique pour Développement
en Coopération

**LABORATOIRE D'HYDROLOGIE**
Centre ORSTOM - BP 5045
34032 MONTPELLIER

**VERSEAU**

Valorisation des Etudes et des Recherches
dans les Sciences de l'EAU

# EXPERIMENTATIONS EN LABORATOIRE ET SUR LE TERRAIN VISANT A TESTER UN PROTOTYPE DE SONDE DE MESURE DE L'HUMIDITE DU SOL PAR CHOCS THERMIQUES

Auteur : Christophe PEUGEOT, Ingénieur ENITRTS

Etude menée dans le cadre
du Contrat de Plan Etat
Région 1989, action de
recherche N992

Septembre 1991

# CADRE GENERAL DE L'ETUDE

But : mise au point d'un prototype d'humidimètre utilisant des sondes à chocs thermiques.

Financement : Région Languedoc-Roussillon et le groupement VERSEAU (Valorisation des Etudes et Recherches dans les Sciences de l'EAU) dans le cadre du contrat de plan Etat-Région 1989, action de Recherche N992.

Laboratoire d'accueil : Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM MONTPELLIER, responsable G. JACCON.

Ce document a été soutenu devant le jury du DEA "Sciences et Techniques de l'Eau" de l'Institut de Mécanique des Fluides de l'Université de Strasbourg et a permis à son auteur d'obtenir ce diplôme avec la mention BIEN.

# SOMMAIRE


## A. SYNTHESE DE L'ETUDE

## B. ETUDE DETAILLEE

NOTATIONS

INTRODUCTION

OBJECTIFS

**PREMIERE PARTIE**

**L'HUMIDITE DES SOLS ET LES METHODES DE MESURE**

I.1. Définitions, généralités. 9

I.1.1. Le sol. 9
I.1.2. Le devenir de l'eau dans le sol. 11

I.2. Les principales méthodes de mesures utilisées. 13

I.2.1. Etuve. 13
I.2.2. Sonde à neutrons. 13
I.2.3. Sonde capacitive. 14
I.2.4. TDR. 15
I.2.5. Télédétection en hyperfréquences. 15
I.2.6. Tensiomètres. 16
I.2.7. Autres méthodes. 16
I.2.8. Synthèse. 17

III.4. Etalonnages au laboratoire. 60

III.4.1. Péliminaires. 60
III.4.2. Etalonnages. 64
III.4.3. Conclusions sur les mesures en laboratoire. 68

III.5. Mesures in-situ. 69

III.5.1. Etalonnages. 69
III.5.2. Comparaison à la méthode TDR. 74
III.5.3.Conclusions sur les essais de terrain. 75

III.6. Synthèse des résultats. 76

III.6.1. Récapitulation, conclusions. 76
III.6.2. Commentaires sur l'instrumentation. 77
III.6.3. Conditions d'utilisation. 77
III.6.4. Cahier des charges
pour une instrumentation performante. 78
III.6.5. Applications possibles. 81

CONCLUSION

REMERCIEMENTS

## C. ANNEXES

ANNEXE 1 : Principe de mesures de températures par thermocouples.

ANNEXE 2 : Exemple de traitement d'un fichier de données brutes.

ANNEXE 3 : Fiches techniques sur l'appareillage.

ANNEXE 4 : Etalonnages de laboratoire : graphes, calculs.

ANNEXE 5 : Etalonnages in-situ : graphes, calculs.

ANNEXE 6 : Planches en couleur.

# SYNTHESE DE L'ETUDE

# EXPERIMENTATIONS EN LABORATOIRE ET IN-SITU VISANT A TESTER UN PROTOTYPE DE SONDE DE MESURE DE L'HUMIDITE DU SOL

## Evaluation de la fiabilité et de la précision de la méthode des chocs thermiques

## INTRODUCTION

Des chercheurs de l'ORSTOM ont étudié il y a une vingtaine d'années une méthode de mesure de l'humidité du sol par chocs thermiques, mais leurs travaux n'ont pas eu de suite en raison de la difficulté de construire une sonde suffisamment fiable pour être utilisée sur le terrain. Grâce à une subvention accordée par la Région Languedoc-Roussillon et le groupement VERSEAU (Valorisation des Etudes et des Recherches dans les Sciences de l'Eau), le laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM a pu reprendre ces recherches en 1991, en exploitant les possibilités de nouveaux matériaux et composants électroniques. Une série de prototypes et une instrumentation de mesure expérimentale ont été réalisées par la société de transfert de technologie ARTECH, en liaison avec le Laboratoire d'Electromécanique de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc.

Les études se sont déroulées en trois étapes. Dans un premier temps, développer, en utilisant les résultats des études antérieures, un modèle théorique adapté à la géométrie des nouvelles sondes, afin de relier l'humidité à mesurer aux autres paramètres du milieu. Puis, valider ce modèle en le confrontant au comportement expérimental des capteurs et étalonner les sondes en laboratoire et sur le terrain. Enfin conclure quant à la fiabilité de l'instrumentation et la précision de la mesure, et établir un cahier des charges pour en améliorer les performances.

### 1.) Le principe de la mesure et les outils utilisés.

#### 1. Principe.

Le principe de la mesure, commun à toutes les méthodes de chocs thermiques, est d'appliquer à un volume de sol connu un créneau de puissance thermique (signal carré) et de mesurer la réponse en température du milieu.

La résolution de l'équation de la chaleur, moyennant les caractéristiques géométriques des sondes et certaines hypothèses simplificatrices (sol considéré comme un milieu homogène, isotrope, infini, faible inertie thermique des sondes, pas de résistance de contact, ...) aboutit à la relation simple suivante :

$$\theta = \frac{\alpha . E}{\Delta T_{max}} - \gamma \qquad (1)$$

dans laquelle $\theta$ est l'humidité du sol, $\alpha$ un paramètre ne dépendant que de la géométrie de la sonde, E l'énergie fournie au sol lors de la chauffe, $\Delta T_{max}$ l'élévation maximale de température mesurée dans le sol et $\gamma$ un paramètre caractéristique des propriétés thermiques du sol.

2. Les outils.

Lors des premières études réalisées entre 1971 et 1975, une sonde "bi-tiges" à été mise au point dans laquelle l'une des tiges supporte l'élément chauffant et l'autre le thermocouple de mesure. Mais le fait que l'écartement entre les deux tiges ne reste pas constant lors de la mise en place dans le sol (perturbation par des cailloux, des racines) a condamné son utilisation.

Pour éviter cet inconvénient, on peut remplacer l'élément chauffant filiforme par une résistance chauffante annulaire, centrée sur un tube portant le thermocouple. De cette manière, la distance de l'anneau au point de mesure reste constante. Quatre sondes de ce type ont été construites, selon deux modèles peu différents (fig. 1).

Outre les sondes, l'instrumentation est complétée par un dispositif d'émission des chocs permettant le réglage de la puissance et de la durée de la chauffe, et par un amplificateur du signal délivré par le thermocouple. Ce signal est enregistré par une centrale d'acquisition automatique de données, placée en bout de chaîne.

## 2). Les mesures.

1. Généralités.

Une première série de mesures à permis de valider le modèle théorique en confrontant la relation (1) au comportement expérimental des sondes . Outre la bonne stabilité mécanique des capteurs, nous avons mis en évidence différentes imperfections du matériel qui affectent la qualité des mesures d'humidité :

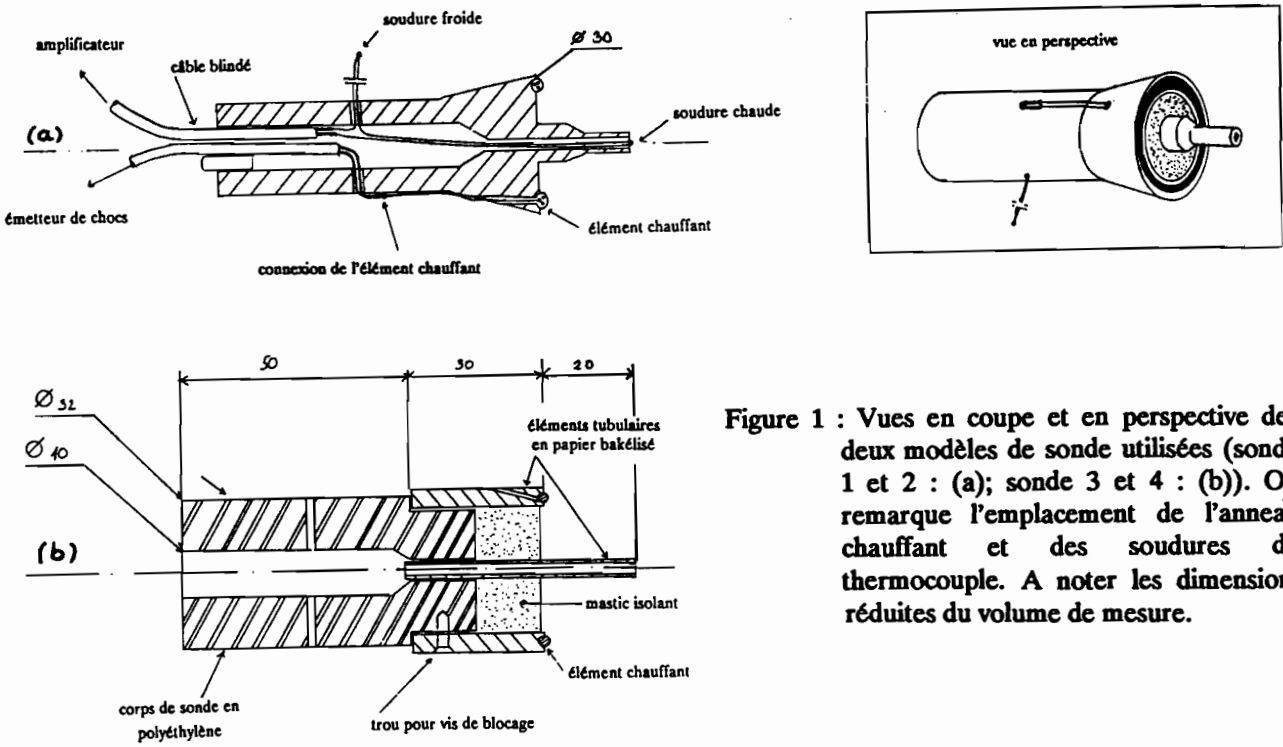



**Figure 1 : Vues en coupe et en perspective des deux modèles de sonde utilisées (sonde 1 et 2 : (a); sonde 3 et 4 : (b)). On remarque l'emplacement de l'anneau chauffant et des soudures du thermocouple. A noter les dimensions réduites du volume de mesure.**

* des court-circuits thermiques à l'intérieur des sondes induisent une sur-estimation de la température du milieu et par conséquent une sous-évaluation de l'humidité. Ce phénomène est de moindre importance dans la mesure où les étalonnages ultérieurs en tiennent compte dans la relation expérimentale $\theta = f(1/\Delta T_{max})$,

* des courants aléatoires parasites peuvent apparaître dans la chaîne de mesure et se superposer aux signaux des thermocouples, rendant ceux-ci inexploitables. Ces problèmes, favorisé par l'interconnexion du boîtier d'émission du choc et des amplificateurs, n'ont pas été résolus,

* une mauvaise connaissance de la puissance dissipée par les sondes n'a pas permis d'exploiter complètement certaines mesures,

* l'extrême sensibilité du gain des amplificateurs à la température a également dépourvu certaines mesures de toute signification.

## 2. Etalonnages.

Malgré ces effets perturbateurs, qui ont réduit le nombre de données utilisables, les étalonnages des sondes ont pu être faits dans d'assez bonnes conditions.

L'étalonnage consiste à déterminer pour chaque sonde la relation expérimentale $\theta = f(1/\Delta T_{max})$, qui est linéaire. La pente de cette droite est égale à $\alpha.E$ (voir relation (1)) où $\alpha$ est caractéristique de chaque sonde. Outre la détermination de $\alpha$, ces expériences visent à montrer que la relation d'étalonnage ne dépend pas du type de sol sur lequel on l'établit.

Les étalonnages de laboratoire ont été réalisés sur des échantillons reconstitués à partir d'un sable et d'un limon. La figure 2 ci-dessous présente les nuages expérimentaux et les droites d'étalonnage calculées pour deux des sondes sur limon. On constate que la relation $\theta = f(1/\Delta T_{max})$ est bien linéaire. La droite de régression à été calée sur le point théorique $(0, -\gamma)$ - où $\gamma$ est le terme constant de (1), déterminé par mesure calorimétrique - en calculant sa pente sur le nuage expérimental étendu au point théorique, cela pour accroître la précision du calcul.

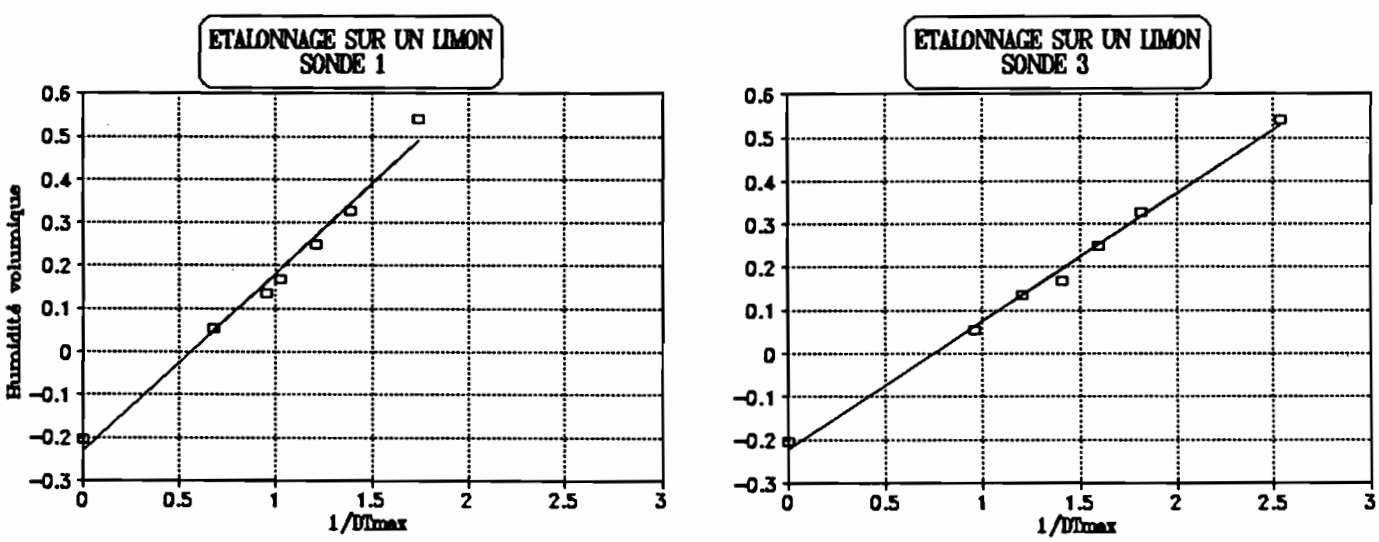



Figure 2 : Droites d'étalonnages obtenues en laboratoire pour les sondes 1 et 3. Les valeurs du coefficient de corrélation sont respectivement 0,98 et 0,99.

La dispersion de certains points peut s'expliquer par l'homogénéité imparfaite des échantillons ou l'incertitude sur la mesure de $\theta$ (méthode gravimétrique), mais surtout par les imperfections citées plus haut.

Un étalonnage similaire a été réalisé sur des parcelles sous culture (fig. 3). Il est manifeste que si les points sont globalement alignés, la dispersion est beaucoup plus grande. Sur des échantillons en place, les hypothèses d'homogénéité relatives au sol sont en effet rarement vérifiées. Cependant, la grande dispersion nous semble avant tout imputable aux diverses imperfections énoncées ci-dessus, et particulièrement à la dérive très importante du gain qu'il n'a pas été possible de corriger. Malgré cela, les droites d'étalonnage "in-situ" on pu être calculées.

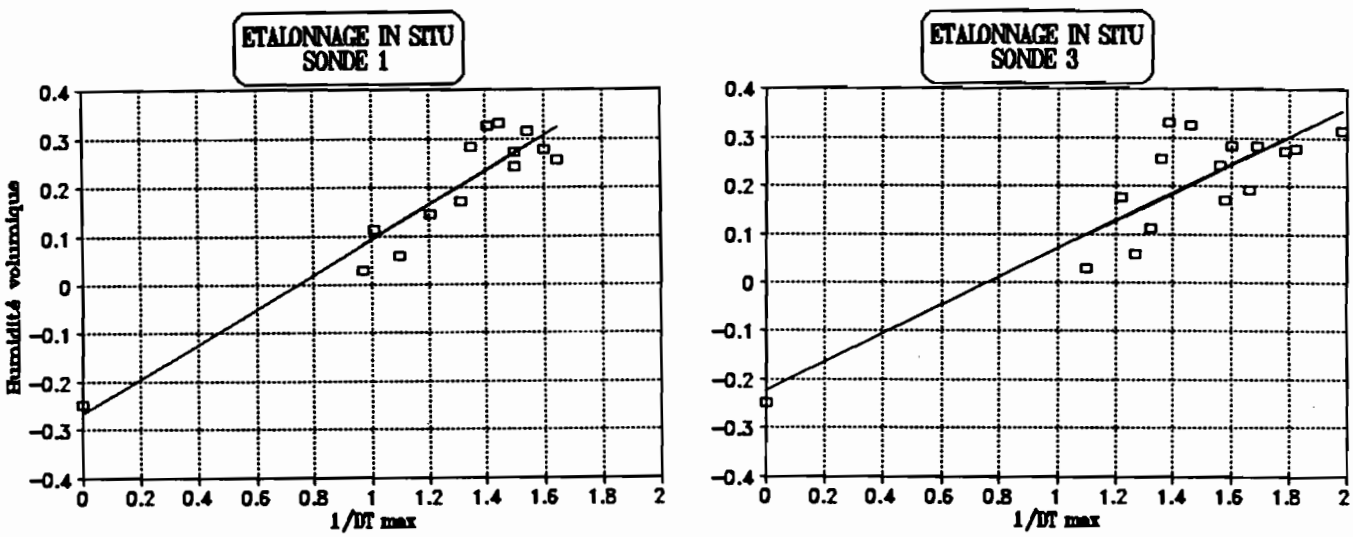



Figure 3 : Droites d'étalonnages obtenues in-situ pour les sondes 1 et 3. Les valeurs du coefficient de corrélation sont respectivement 0,73 et 0,42.

Les valeurs des pentes de toutes les droites d'étalonnage calculées, ramenées aux mêmes conditions de référence, sont rassemblées dans le tableau de la figure 4. La variabilité d'une sonde à l'autre s'explique par le fait qu'elles ne sont pas strictement semblables entre elles (en particulier pour la sonde 3, les valeurs sont plus faibles). La variabilité d'un essai à l'autre est due à la diversité des conditions d'expériences, mais surtout aux imprécisions introduites par la chaîne de mesure que des corrections n'ont que partiellement atténué.

Le tableau de la figure 5 ci-dessous présente la valeur moyenne des pentes calculée pour chaque capteur, et l'écart-type qui, s'il n'a pas de réelle signification statistique (trop peu de valeurs) donne une idée de la dispersion des pentes. Il en résulte que le coefficient d'étalonnage est le même à 5 % près. Ce résultat est encourageant, même s'il ne permet pas de conclure que l'étalonnage est universel. On peut noter que la dispersion des pentes est plus forte pour les sondes n° 3 et 4, qui se sont effectivement révélées moins fiables.

| | LABORATOIRE | | | TERRAIN |
|---|---|---|---|---|
| | SABLE | | LIMON | LIMON |
| SONDE 1 | | 0.334 | 0.341 | 0.337 |
| SONDE 2 | 0.356 | 0.355 | 0.344 | 0.341 |
| SONDE 3 | | 0.311 | 0.244 | 0.269 |
| SONDE 4 | | 0.345 | 0.325 | 0.316 |

**Figure 4 : Présentation des valeurs de pente obtenues lors des différents étalonnages ramenées aux mêmes conditions de référence.**

| | Moyenne | Ecart type % |
|---|---|---|
| SONDE 1 | 0.335 | 0.4 |
| SONDE 2 | 0.349 | 2.1 |
| SONDE 3 | 0.290 | 7.2 |
| SONDE 4 | 0.330 | 4.5 |

**Figure 5 : Valeur moyenne du coefficient d'étalonnage calculé pour chaque sonde et écart-type.**

Lors des mesures in-situ, nous avons aussi pu comparer les valeurs de l'humidité "chocs thermiques" aux valeurs obtenues par sonde TDR (Time Domain Reflectivity). Si les valeurs sont fortement corrélées, la précision des mesures est mauvaise.

Ces résultats montrent que l'appareillage mis au point est prometteur mais trop peu fiable sous sa forme actuelle. Il est nécessaire de supprimer le plus possible les causes d'incertitude en améliorant la qualité des différents éléments. Une fois ces modifications faites, de nouveaux tests permettront d'évaluer réellement la précision des mesures.

### 3). Amélioration du matériel

Les principaux problèmes observés lors des différents essais ont été les suivants :

* mauvaise stabilité du terme UIΔt (énergie fournie au sol),
* fluctuation du gain des amplificateurs,
* présence de parasites,
* fuites et court-circuits thermiques dans les sondes.

Il est nécessaire d'apporter certaines modifications aux différents éléments pour en accroître la fiabilité.

1. Sondes.

L'utilisation d'autres matériaux pourrait améliorer leurs caractéristiques, notamment réduire les ponts thermiques. Nous proposons par exemple de réduire la capacité thermique de l'anneau chauffant et de le coller sur un excellent isolant thermique (Kapton, Mylar[1], bakélite...) pour limiter les transferts radiaux et l'échauffement du tube. Cette tête de sonde serait fixée sur un corps en matière plastique, par l'intermédiaire d'une couche de bakélite isolante (éviter les "fuites" dans le corps de sonde). Pour faciliter la connexion des câbles, le corps de sonde sera usiné sous la forme de deux demi-coques, emboîtables.

L'utilisation de thermocouples de type E (Ni-Cr,Cu-Cr : 60 $\mu$V/°C) rendrait plus aisée la mise en oeuvre (réalisation des soudures chaudes et froides) et permettrait de disposer d'une tension plus forte.

2. Emetteur de chocs :

Il faut accroître la précision sur la valeur du produit UI.$\Delta$t (énergie E fournie au sol) en remplaçant par exemple les potentiomètres par deux contacteurs à 3 positions (30, 40 et 50 s pour $\Delta$t et 4, 7 et 10 V stabilisées pour l'alimentation des résistances chauffantes) soit 9 valeurs possibles pour E, garanties à la précision de 1 %.

3. Amplificateurs :

L'abaissement du gain à 100 pourra réduire la sensibilité des signaux aux courants parasites et les normaliser (0 - 10 mV). La suppression de la sensibilité du gain à la température est nécessaire; il faut garantir une valeur constante du gain sur la plage de températures 10 - 50 °C. Il faut en outre étudier les moyens de supprimer tous les parasites.

La présentation de l'ensemble en un seul boîtier réunissant l'émetteur et les amplificateurs faciliterait les mesures. Pour garantir le bon fonctionnement de l'électronique, une ventilation est nécessaire.

[1]. Marques déposées.

# ETUDE DETAILLEE

# NOTATIONS

Les unités mentionnées sont celles utilisées dans ce mémoire.

| | | |
|---|---|---|
| a | diffusivité thermique. | $[m^2/s]$ |
| C | capacité calorifique volumique | $[cal/cm^3.°C]$ |
| $\Gamma$ | capacité calorifique massique | [cal/g.°C] |
| $\Delta t$ | durée d'un choc thermique | [s] |
| $\Delta T$ | élévation de température | [°C] |
| $\Delta T_{max}$ | élévation maximale de température | [°C] |
| $\theta$ | humidité volumique | [ - ] |
| I | courant traversant la résistance chauffante | [A] |
| $\lambda$ | conductivité thermique | [W/m.K] |
| P | puissance électrique | [W] |
| $\rho$ | masse volumique | $[g/cm^3]$ |
| r | distance d'un point à la source chauffante | [cm] |
| R | rayon de la spire chauffante | [cm] |
| t | temps | [s] |
| $t_m$ | temps de propagation de $\Delta T_{max}$ | [s] |
| T | température | [°C] |
| U | tension aux bornes de la résistance chauffante | [V] |
| w | humidité pondérale | [ - ] |

## INTRODUCTION

La connaissance de la teneur en eau d'un sol est précieuse pour l'hydrologue, qui s'intéresse à toutes les phases du cycle de l'eau. Il doit donc disposer d'instruments de mesure de l'humidité volumique suffisamment performants. Parmi les différentes méthodes possibles, celles qui utilisent les propriétés thermiques des sols ont été étudiées, mais n'ont pas abouti au développement d'appareils opérationnels, pour des raisons technologiques essentiellement.

Les travaux entrepris dans les années 70 par B. Pouyaud et R. Chartier de l'ORSTOM ont montré que la méthode des chocs thermique pouvait être utilisée pour la mesure de l'humidité. Les résultats encourageants qu'ils ont obtenus n'ont pas été exploités en raison de l'impossibilité de construire un prototype d'appareil suffisamment fiable pour être utilisé sur le terrain.

En 1991, la Région Languedoc-Roussillon par l'intermédiaire de l'organisme VERSEAU (Valorisation des Etudes et des Recherches dans les Sciences de l'Eau), intéressée par les problèmes de gestion de la ressource en eau, a accordé une subvention au laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM pour lui permettre de reprendre ses recherches en utilisant des matériaux nouveaux et des composants électroniques disponibles sur le marché.

Une première série de prototypes et une instrumentation de mesure expérimentale ont été réalisées par la société de transfert de technologie ARTECH, en liaison avec le Laboratoire d'Electromécanique de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc.

Après un rappel des principales méthodes de mesure de l'humidité du sol, ce mémoire présente les résultats les plus importants obtenus par B. Pouyaud. La troisième partie du document décrit les différentes phases de tests de l'appareillage expérimental (capteurs, chaine de mesure, ...), les modifications qu'il a fallu apporter, et les résultats des expérimentations en laboratoire et sur le terrain. Les conclusions des essais sont présentées en fin d'ouvrage.

## OBJECTIFS

Nous avons fixé trois objectifs, qui ont guidé les travaux de recherche.

Si B. Pouyaud a démontré la validité théorique de la méthode des chocs thermiques et son aptitude à mesurer la teneur en eau, la mise au point d'une instrumentation nouvelle, plus fiable, nécessite de développer un modèle théorique qui lui est adapté et qui relie l'humidité à mesurer aux différents paramètres du milieu.

Nous nous attacherons ensuite à valider ce modèle en le confrontant au comportement expérimental des capteurs. Lors d'essais en laboratoire et sur le terrain, on cherchera à évaluer les performances de la chaîne de mesure.

Enfin, au vu des résultats de ces tests, nous saurons si l'outil prototype que l'on a mis au point permet la mesure de la teneur en eau d'un sol avec une plus grande fiabilité que l'appareillage de B. Pouyaud. Nous préciserons ses conditions d'utilisation, ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

# PREMIERE PARTIE

## L'HUMIDITE DES SOLS ET LES METHODES DE MESURE

## I.1. Définitions - Généralités.

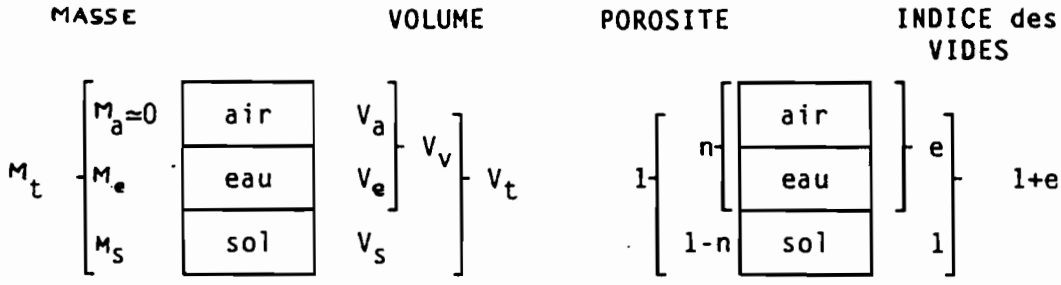
### I.1.1 Le sol.

Le sol est la couche superficielle de l'écorce terrestre. Epaisse de quelques mètres, elle est constituée d'un agencement de matériaux non consolidés; c'est un milieu triphasique, puisque l'on y trouve des morceaux de roche et de la matière organique plus ou moins décomposée, de l'air et de l'eau sous différentes formes.

On peut définir des grandeurs physiques et des paramètres qui décrivent l'état d'un sol.

#### I.1.1.1. Grandeurs physiques.

On schématise la répartition des trois phases du sol comme ci-dessous:



* Porosité: c'est le volume des vides rapporté au volume total, exprimé en %.

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

* Indice des vides: C'est le volume des vides rapporté au volume de la phase solide, exprimé en %.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

* Densité apparente: C'est la masse de l'échantillon rapportée à son volume total.

$$\rho_a = \frac{M_t}{V_t}$$

* Teneur en eau pondérale: C'est la masse d'eau contenue dans l'échantillon de sol, rapportée à la masse de sol sec.

$$w = \frac{M_e}{M_{sec}}$$

* Teneur en eau volumique: C'est le volume d'eau contenu dans l'échantillon, rapporté au volume total.

$$\theta = \frac{V_e}{V_t}$$

La teneur en eau volumique est plus souvent utilisée en hydrologie et en agronomie, car dans ces disciplines, on s'intéresse à la quantité d'eau contenue dans un volume donné.

Ce paramètre permet aussi de déterminer le stock d'eau contenu dans une tranche de sol. On peut noter que $\theta$ est plus difficile à déterminer que w, la détermination d'un volume in-situ n'étant pas une chose aisée.

I.1.1.2. Paramètres décrivant un sol.

Un type de sol peut se caractériser par les paramètres suivants.

* la texture, ou composition granulométrique, qui précise la répartition statistique des éléments constitutifs selon leur taille On répartit généralement les constituants en trois grandes classes granulométriques: les argiles, particules de taille inférieure à 2 $\mu$m, les limons, de taille comprise entre 2 et 50 $\mu$m et les sables, de taille supérieure à 50 $\mu$m.

* la structure, qui définit les modes d'agencement des constituants entre eux.

* la composition minéralogique.

* la teneur en matière organique.

**I.1.2. Le devenir de l'eau dans le sol.**

Lors d'une pluie, l'eau précipitée se répartit en trois catégories, selon les phénomènes auxquels elle est soumise, qui sont l'eau de ruissellement, l'eau évaporée et l'eau d'infiltration. On s'intéressera plus particulièrement à cette dernière catégorie.

L'eau qui s'infiltre dans la matrice poreuse du sol remplit les pores en remplaçant l'air qu'ils contiennent. Elle se trouve alors dans différents états énergétiques.

On distingue:

* l'eau gravitaire, mobilisable par gravité,
* l'eau capillaire, retenue autour des particules de sol par des forces de capillarité,
* l'eau hygroscopique, adsorbée sur les parois des éléments constitutifs du sol,
* l'eau de constitution qui, intégrée aux structures des minéraux, n'est pas mobilisable.

On introduit la notion de potentiel hydrique pour quantifier l'état énergétique de l'eau du sol. Il est défini comme étant la pression de rétention de l'eau dans la matrice poreuse. C'est donc une grandeur négative; on parle de succion. C'est aussi la pression qu'il faudrait appliquer à cette matrice pour mobiliser l'eau.

Le potentiel total $\Psi$ de l'eau du sol, défini par rapport à un potentiel de référence, se décompose en potentiel gravitaire, potentiel matriciel, qui est celui de l'eau hygroscopique et capillaire, et potentiel osmotique, correspondant à la diffusion de l'eau par osmose.

Différentes unités sont utilisées pour définir le potentiel. En hydrologie, ou en agronomie, il est exprimé en pression ($M.L^{-1}.T^{-2}$) ou en charge hydraulique (L)

Le potentiel hydrique est un indicateur de la quantité d'eau présente dans le sol. La loi $\Psi = f(\theta)$ n'est cependant pas univoque. La courbe représentative de f n'est pas la même selon que l'on s'intéresse à l'humectation ou à la dessiccation (fig. I.1.). Ce phénomène d'hystérésis complexe est dû principalement à la présence d'air dans le sol, aux mécanismes de capillarité, et aux caractéristiques non uniformes des pores.

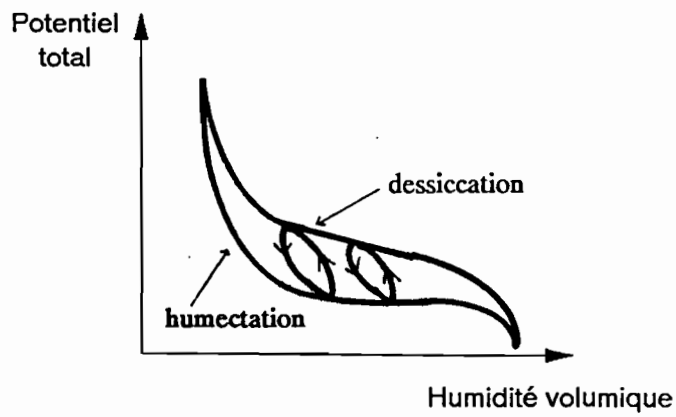



**Fig. I.1. Phénomène d'hystérésis. A potentiel donné, l'humidité est plus faible à l'humectation qu'à la dessication.**

## I.2. Les principales méthodes de mesures de l'humidité du sol.

### I.2.1. Etuve.

C'est la méthode de mesure de la teneur en eau d'un sol qui sert de référence pour toutes les autres. Elle découle directement de la définition de la teneur en eau.

On prélève un échantillon de sol au cylindre, sans en modifier la densité (pas de tassements). On le pèse avant et après passage à l'étuve à 105 °C. La différence entre les deux pesées donne la masse d'eau dans l'échantillon humide. Si l'on ramène cette valeur au volume ou à la masse sèche de l'échantillon, on détermine la teneur en eau volumique ou pondérale.

Pour des sols sableux ou limoneux, le passage à l'étuve dure 24 heures. Pour les argiles, il faut compter 48 heures au moins pour avoir évaporation totale de l'eau non liée.

### I.2.2. La sonde à neutrons.

Des neutrons de haute énergie (neutrons rapides) sont émis par une source à l'Américium-Béryllium placée dans le milieu à caractériser. Ils entrent en collision avec les éléments constitutifs du milieu et perdent un peu de leur énergie à chaque choc. On montre que cette perte d'énergie est d'autant plus importante que la masse des noyaux rencontrés est proche de 1. Les neutrons réfléchis par les noyaux d'hydrogène, dits neutrons thermiques, sont donc ceux qui ont été les plus ralentis. Ils sont comptés par un dispositif approprié.

Pour un temps de comptage donné, le nombre de neutrons lents captés par le compteur est d'autant plus grand que le milieu est riche en atomes d'hydrogène[1]. On évalue ainsi la quantité d'eau présente dans le milieu.

L'humidimètre à neutrons est constitué d'une sonde renfermant la source Am-Be et le compteur de neutrons lents, que l'on descend dans un tube à la profondeur désirée, et d'une électronique de traitement du signal donné par le compteur.

Un étalonnage du sol est nécessaire car l'hydrogène de constitution des minéraux participe à la thermalisation des neutrons rapides.

Le volume de sol concerné par la mesure est une sphère d'environ 20 cm de diamètre, centrée sur la source de neutrons.

---

[1]. La masse du noyau d'hydrogène est 1 g/mol.

### I.2.3. Sonde capacitive.

Les sondes capacitives, comme les sondes TDR (time domain reflectometry) ou les méthodes en hyperfréquences utilisent les propriétés diélectriques du sol.

#### I.2.3.1. Généralités sur les diélectriques.

Un corps diélectrique est un isolant à très faible conductivité électrique. On le caractérise par sa permittivité relative $\epsilon'$. Pour une fréquence de champ électrique alternatif inférieur à 5 GHz, on constate qu'il existe une forte variation de la permittivité du sol en fonction de la teneur en eau. On peut donc établir une relation $\epsilon' = f(\theta)$.

Mais $\epsilon'$ ne peut se déterminer qu'indirectement par la mesure d'une capacité électrique (sonde capacitive), d'une vitesse de propagation (sonde TDR) ou de l'absorption d'une onde électromagnétique (télédétection en hyperfréquences).

#### I.2.3.2. Sonde capacitive.

On introduit dans le sol deux tiges métalliques qui constituent un condensateur que l'on relie à un bobine de self-induction. La fréquence de résonance de ce circuit (L,C) est donnée par la relation:

$$Fo = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

où L et C sont respectivement l'impédance et la capacité électrique du circuit.

Fo s'exprime par ailleurs en fonction de la permittivité du milieu par:

$$Fo = \frac{1}{\sqrt{(\alpha + \beta\ \epsilon')}}$$

où $\alpha$ et $\beta$ sont des constantes.

L'appareillage mesure la capacité électrique du sol. Grâce aux équations ci-dessus, on relie $\epsilon'$ à C et un étalonnage permet d'établir la relation $\theta = f(\epsilon')$.

### I.2.4. Méthode TDR.

On détermine la permittivité relative du sol en calculant la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique entre deux guides d'onde.

On montre que l'on a la relation:

$$\epsilon = \frac{(c\,t)^2}{(2\,l)^2}$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide,
t le temps de parcours,
l la longueur d'une tige guide.

Les discontinuités d'impédance du milieu provoquent une réflexion d'une partie de l'énergie de l'onde, que l'on peut enregistrer à l'aide d'un dispositif approprié.

L'appareillage comprend un générateur d'impulsions, un récepteur détectant les réflexions, une horloge et un système de visualisation.

La sonde est constituée de deux tiges métalliques, reliées à un câble coaxial, qui servent de guide à l'onde électromagnétique. La connexion est coulée dans un bloc de résine pour être à l'abri de l'humidité. Elle constitue, avec l'extrémité des deux tiges guides, une discontinuité d'impédance et provoque une réflexion partielle de l'onde. La vitesse de propagation est mesurée entre ces deux limites.

A noter que la longueur minimale des tiges est de 15 cm; en dessous de cette valeur, il est difficile de mesurer les temps de parcours, devenus très brefs.

Le volume de mesure est un cylindre dont la hauteur est égale à la longueur des tiges et le diamètre environ le double de l'écartement de celles-ci.

### I.2.5. Télédétection en hyperfréquences.

Cette méthode permet la détermination de l'humidité en surface (0-15 cm) par la mesure de l'émission thermique de la surface du sol (télédétection passive) ou par la mesure du coefficient de rétrodiffusion d'une onde électromagnétique (télédétection active).

La télédétection passive est difficile à mettre en oeuvre car il est nécessaire de connaître la rugosité de la surface. En outre, elle est sensible aux rayonnements parasites.

La télédétection active utilise un signal radar. Le coefficient de rétrodiffusion est fonction de l'atténuation du signal à la réflexion, qui elle même dépend de la teneur en eau du sol.

La méthode nécessite l'emploi d'un radar embarqué à bord d'un avion ou d'un satellite.

### I.2.6. Tensiomètres.

La méthode tensiométrique permet la détermination de la teneur en eau du sol par la mesure du potentiel hydrique du milieu. Un tensiomètre est constitué d'un tube transparent à la base duquel se trouve une bougie poreuse en céramique. L'ensemble est saturé en eau et la colonne d'eau est reliée à un manomètre à mercure ou à cadran. Les échanges d'eau ont lieu à travers les parois de la bougie jusqu'à ce que l'équilibre entre la pression de l'eau dans le sol et dans la bougie soit réalisé. Le manomètre donne la valeur du potentiel hydrique dans le volume de sol entourant la bougie.

On introduit le tube verticalement dans un avant-trou. La mesure ne peut se faire que lorsque l'équilibre des pressions est réalisé.

La gamme des potentiels mesurables est limitée par l'apparition de cavitation dans le tube pour des succions de l'ordre de -960 hp (mbars).

### I.2.7. Autres méthodes.

Nous nous limiterons à l'exposé des principes généraux de ces méthodes.

#### I.2.7.1. Méthode micropsychrométrique.

Elle consiste à mesurer la température d'évaporation (méthode psychrométrique) ou de condensation de l'eau gazeuse contenue dans l'atmosphère du sol (méthode hygrométrique ou du point de rosée).

L'appareillage est constitué d'un thermocouple enfermé dans une bougie poreuse et d'une électronique de traitement du signal. Après la mise à l'équilibre des pressions de vapeur de part et d'autre des parois de la bougie, la température d'évaporation ou de condensation est donnée par le thermocouple.

Cette méthode permet de mesurer des pressions de -50 à -60 bars, correspondant à des teneurs en eau très faibles.

#### I.2.7.2. Méthode par résonance magnétique nucléaire.

Elle est fondée sur la propriété qu'ont certains noyaux atomiques de présenter un moment magnétique; ils se comportent alors comme un aimant. La technique RMN à onde continue consiste à mesurer la fréquence de résonance des noyaux atomiques placés dans un champ magnétique permanent. Dans la technique RMN à impulsions, on mesure la réponse des noyaux à une courte excitation en radio-fréquence.

Dans les deux cas, l'énergie électromagnétique absorbée par les noyaux est proportionnelle au nombre d'atomes dans le volume de mesure. Les noyaux entourés d'un petit nombre d'électrons (ex. l'hydrogène) donnent la meilleure réponse. On peut ainsi déterminer la teneur en eau du sol.

### I.2.8. Synthèse

Nous venons de passer en revue les plusieurs méthodes de mesure de l'humidité des sols. Le tableau ci-contre reprend les plus importantes d'entre elles en précisant leurs principales caractéristiques.

Certaines sont adaptées à la mesure de l'humidité de surface (télédétection,...), mais sur une étendue assez vaste. D'autres (tensiomètres, sondes capacitives) mesurent la teneur en eau dans des petits volumes de sol. L'intérêt principal de la méthode des chocs thermiques est de permettre, de par la taille des capteurs, à la fois la mesure de l'humidité en surface et dans un petit volume de matériau. Par ailleurs, l'appareillage pourrait être peu coûteux (quelques milliers de francs).

Des applications pourraient alors être faites dans des domaines tels que le pilotage de réseaux d'irrigation, la mesure l'humidité près des racines, l'étude fine de la répartition de l'eau dans le sol, la détermination de "vérités terrain" pour caler des mesures par télédétection, etc...

Pour toutes ces raisons, la méthode des chocs thermiques est intéressante et mérite que l'on développe un appareillage opérationnel.

# SECONDE PARTIE

## MESURE DE L'HUMIDITE DU SOL PAR SONDE A CHOCS THERMIQUES

## II.1. Généralités sur les transferts d'eau et de chaleur dans les sols.

### II.1.1. Transferts de chaleur.

La chaleur se propage dans un milieu selon trois modes différents: la conduction, la convection, le rayonnement.

#### II.1.1.1. Conduction.

La conduction dans un solide ou un fluide est un transport de chaleur sous l'influence d'un gradient de température, sans déplacement de particules. C'est un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une molécule adjacente. Ce phénomène est modélisé par la loi de Fourier:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = -\lambda . S \frac{dT}{dx}$$

où Q est la quantité de chaleur transmise, t le temps, $\lambda$ la conductivité thermique du milieu, S la surface de transmission et dT/dx le gradient de température,

#### II.1.1.2. Convection.

La convection dans un fluide est un transport de chaleur par mélange de plusieurs parties du fluide, à des températures différentes. Le mouvement du fluide peut être dû à des différences de densité ou à des causes externes (convection forcée). Il existe simultanément un transport d'énergie par conduction entre les particules du fluide.

II.1.1.3. Rayonnement.

Le transfert de chaleur par rayonnement met en jeu une onde électromagnétique (infra-rouge). Le rayonnement d'un corps dépend principalement de la température et de l'état de la surface. La loi de Stefan-Boltzmann décrit ce phénomène:

$$d\Phi = \sigma \, ds \, T^4$$

où $d\Phi$ est la quantité de chaleur transmise par rayonnement, $\sigma$ un paramètre dimensionnel, ds l'élément de surface et T la température absolue de la surface.

Dans un milieu donné, les trois phénomènes énoncés ci-dessus peuvent avoir lieu simultanément, l'un d'eux étant prépondérant.

Afin de caractériser un milieu du point de vue thermique, on définit les paramètres suivants, dénommés dans la suite **paramètres thermocinétiques**:

* *Conductivité thermique* [2]: $\lambda$ [W/m.K]

Elle traduit l'aptitude d'un milieu à propager la chaleur par conduction; elle intervient dans la loi de Fourier.

* *Diffusivité thermique* : a [$m^2/s$]

Elle traduit l'aptitude d'un milieu à diffuser la chaleur.

* *Chaleur spécifique ou capacité calorifique massique* : $\Gamma$ [J/kg.K]

C'est par définition la quantité d'énergie qu'il faut apporter à un corps pour élever l'unité de masse de ce corps d'un degré.

* *Chaleur volumique ou capacité calorifique volumique* : C [$J/m^3$.K].

C'est, par analogie avec la définition précédente, la quantité d'énergie qu'il faut apporter à un corps pour élever l'unité de volume de ce corps d'un degré. On ne peut la déterminer directement; on l'obtient à partir de $\Gamma$ par les relations:

$$C = \Gamma \, . \, \rho \quad \text{et} \quad \lambda = C \, . \, a.$$

---

2. ou conductibilité thermique.

### II.1.2. Les milieux poreux.

Les transferts de chaleur en milieu poreux humide peuvent se faire selon plusieurs modes bien distincts. L'objet de cette partie est de présenter les mécanismes mis en jeu dans la transmission de la chaleur. Certaines constatations permettront en outre de justifier plusieurs hypothèses simplificatrices utilisées pour le développement du modèle mathématique.

Un milieu poreux humide, triphasique, est soumis à des transferts de chaleur entre les constituants solides, mais aussi à travers les pores. On peut distinguer six mécanismes:

* Conduction entre les constituants solides,
* Conduction par l'eau,
* Conduction par l'air,
* Rayonnement entre les parois des pores,
* Convection,
* Diffusion d'eau en phase gazeuse.

On associe aux trois premiers phénomènes une conductivité thermique, $\lambda_s$, $\lambda_l$, $\lambda_g$. Ils sont régis par la loi de Fourier.

Les pores sont trop petits pour que la convection soit significative. On la néglige ainsi que le rayonnement.

En revanche, la diffusion de vapeur d'eau a une importance démontrée pour les transferts de chaleur.

La matrice poreuse humide est un réseau de capillaires saturés en eau et de pores contenant de l'air. Si l'on considère un pore, dont deux faces sont à des températures différentes, l'eau des capillaires se vaporise au voisinage de la face chaude, diffuse sous forme gazeuse à travers l'air du pore, et se condense sur la face froide, en libérant la chaleur de vaporisation. On définit la conductivité thermique équivalente au transport diffusif: $\lambda_{dif}$.

Les paramètres $\lambda_l$, $\lambda_g$, varient peu avec la température, mais $\lambda_{dif}$ augmente sensiblement au dessus de 30 °C (Fig. II.1.). On montre également que $\lambda_s$ reste invariant.

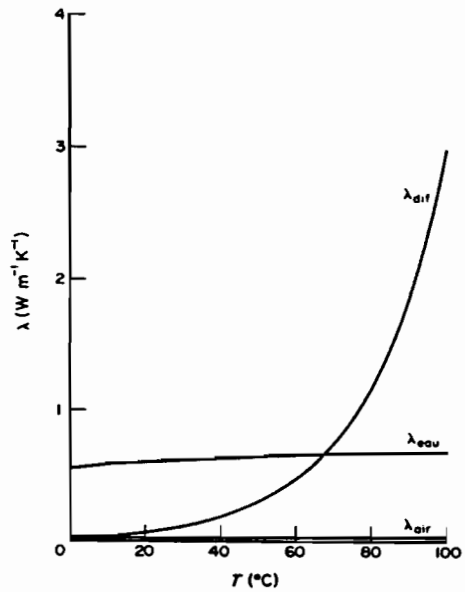



**Fig. II.1. Variation des conductivités $\lambda_l$, $\lambda_g$ et $\lambda_{dif}$ en fonction de la température. (d'après Azizi et coll.)**

Azizi (et coll.) propose d'écrire, pour le milieu poreux:

$$k = \lambda + f\,\lambda_{dif}$$

où k est la conductivité apparente du milieu, et f un facteur de résistance à la diffusion. (Azizi. S. 1988)

Les mêmes auteurs ont montré que pour des températures pour lesquelles les effets d'évaporation-condensation sont peu importants (température inférieure à 25°C environ), k varie peu avec la température ($\lambda_{dif}$ faible).

Pour des teneurs en eau très fortes, ou très faibles, k est peu sensible à la température, les pores étant soit pleins d'air, soit pleins d'eau.

La courbe de la fig. II.2. montre que k augmente lentement avec la teneur en eau. L'expérience que l'on relate ici concerne un béton léger. Dans d'autres matériaux, en particuliers les sols, les résultats restent valables.

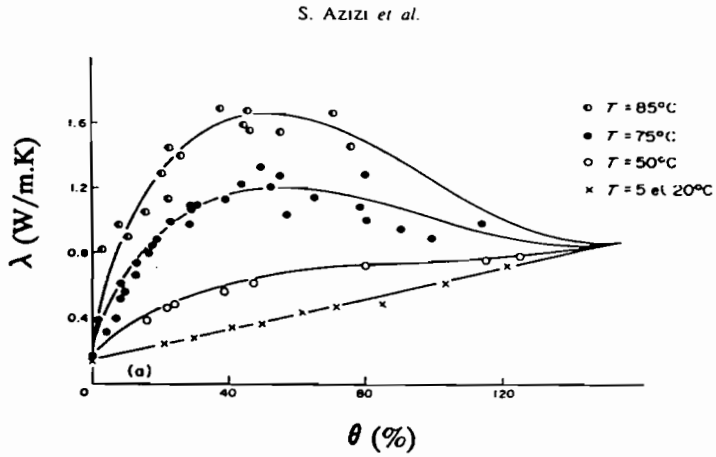



Fig. II.2. Evolution de la conductivité thermique apparente λ d'un béton léger en fonction de la température et de l'humidité. (d'après Azizi et coll.)

On peut donc considérer que si la température du milieu reste assez basse (voisine de l'ambiante), le paramètre k, (conductivité thermique apparente du milieu) qui intègre tous les phénomènes de transferts de chaleur, est peu sensible à la température et à la teneur en eau.

Par ailleurs, la diffusivité thermique est pratiquement invariante avec la température.

Les transferts de chaleur seront donc assimilés à des transferts conductifs purs. La diffusion de vapeur d'eau est supposée ne pas influencer la conductivité apparente globale k du milieu. Dans le modèle mathématique, nous admettrons que la conductivité réelle λ du milieu est égale à k.

## II.2. Synthèse bibliographique sommaire des méthodes à chocs thermiques.

De nombreuses méthodes impulsionnelles employant des sondes à chocs thermiques ont été développées. Les premiers travaux datent de 1949 et 1958 (Van der Held et al.) et proposent une méthode de détermination de la conductivité thermique des liquides; elle consiste à mesurer l'évolution de la température du milieu que l'on échauffe avec une résistance chauffante filiforme. La conductivité se déduit de la courbe du thermogramme $T=f(t)$.

Cette technique à été adaptée par d'autres auteurs pour caractériser des roches (Bloomert & Ward - 1979) et des sols (De Vries & Peck - 1958), des matériaux de construction (Bastian - 1982, Laurent - 1984) ou des produits agro-alimentaires (Gonnet - 1985).

La diffusivité thermique, peut se déterminer par des méthodes analogues. Le rapport de la conductivité sur la diffusivité est égal à la capacité thermique volumique du milieu, que l'on peut aisément relier à sa teneur en eau. Ainsi, Hamburger & Mercier (1979) ont développé un modèle mathématique permettant de déterminer à la fois ces deux paramètres à partir d'une série de mesures et d'obtenir in fine l'humidité volumique.

A notre connaissance, aucune de ces techniques n'a permis l'élaboration d'un matériel de mesure de la teneur en eau in situ réellement fonctionnel et fiable .

## II.3. Les travaux de l'ORSTOM.

### II.3.1. Présentation.

Dans les années 1970, B. Pouyaud (ORSTOM) s'est intéressé à la détermination directe de la chaleur volumique d'un sol, sans passer par a et $\lambda$, et a mis au point avec R. Chartier un appareillage de mesure de l'humidité in-situ (Pouyaud et Chartier - 1971, Pouyaud - 1975). Celui-ci se compose d'une ou plusieurs sondes à chocs thermiques et d'un dispositif de génération de créneaux[3] de puissance électrique et de traitement des signaux des sondes.

Les sondes, de type "bi-tiges", sont constituées de deux tiges parallèles distantes de 1 à 5 cm (fig. II.3. ci-contre): une résistance chauffante filiforme et une tige supportant un thermocouple qui mesure la température du milieu. On trouvera en **Annexe 1** des précisions sur la mesure de températures par thermocouples.

---

[3]. On défini un créneau comme un signal carré valant la quantité Q pendant la durée $\Delta t$, et 0 pour $t > \Delta t$.

Le principe de la mesure est le suivant :

on applique aux bornes de la résistance un créneau de tension, et l'on mesure l'élévation de température produite par ce choc thermique au voisinage du thermocouple. L'élévation maximale de température $\Delta T_{max}$ est liée à la teneur en eau par une relation simple.

### II.3.2. Résultats théoriques.

Le problème revient à déterminer la loi d'échauffement d'un milieu par un élément chauffant filiforme et de longueur finie qui délivre dans le sol un flux de chaleur Q pendant $\Delta t$. Cette loi est donnée par la relation suivante :

$$T(r,t) = \frac{Q.\Delta t}{4\lambda\pi} \cdot \frac{e^{-r^2/4at}}{t} \cdot \int_0^c \frac{e^{-z^2/4at}}{\sqrt{r^2+z^2}}\,dz \qquad (1)$$

dans laquelle $\lambda$ et a sont la conductivité et la diffusivité thermique du milieu, c la demi-longeur de l'élément chauffant, r la distance au point de mesure et z la cote (voir fig II.4).

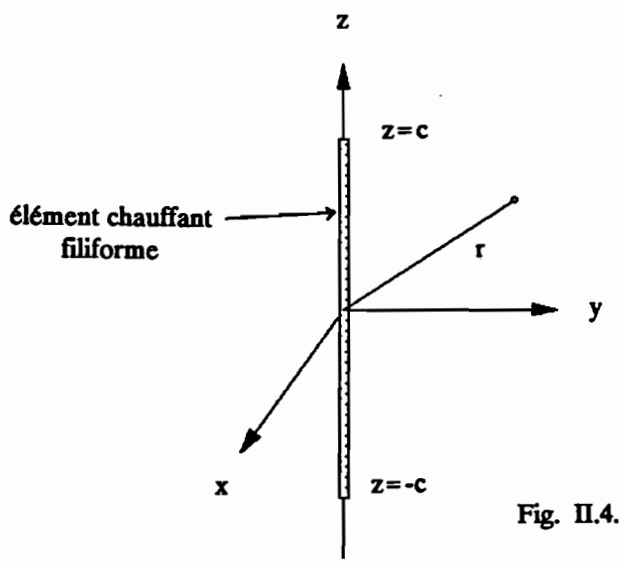



Fig. II.4. Représentation schématique de l'élément chauffant filiforme; r est la distance au point de mesure.

Cette fonction passe par un maximum pour $t = r^2 / 6.a$ qui s'écrit :

$$\Delta T_{max} = \frac{Q.\Delta t}{2\pi e} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(c/r)^2}} \qquad (2)$$

où e est la base du logarithme népérien .

Cette relation donne l'élévation maximale de température du milieu. Il faut la relier à la teneur en eau.

La quantité de chaleur Q fournie à une masse $M_h$ de sol humide et qui provoque une élévation de température $\Delta T$ peut s'écrire, en faisant l'hypothèse que l'on peut appliquer la loi des mélanges:

$$Q = M_h \Gamma_h \Delta T = M_s \Gamma_s \Delta T + M_e \Gamma_e \Delta T$$

où $M_s$ est la masse de sol sec,
$M_e$ est la masse d'eau contenue dans le sol,
$\Gamma_h$, $\Gamma_s$, $\Gamma_e$ sont les chaleurs spécifiques des constituants.

En considérant que les volumes humides et secs du sol sont identiques, en divisant la relation précédente par le volume du sol, il vient:

$$M_h/V_s \Gamma_h = M_s/V_s \Gamma_s + M_e/V_s \Gamma_e$$

c'est à dire:

$$C_h = C_s + \theta\, C_e = \Gamma_s \rho_s + \theta\, C_e \qquad (3)$$

où les $C_i$ sont les chaleurs volumiques des constituants, et $\theta$ la teneur en eau.

On vient de montrer que la capacité calorifique volumique d'un sol humide est la **somme de la capacité calorifique du sol sec et de celle de l'eau du sol.**

La combinaison de (2) et (3) aboutit à

$$\theta = \frac{Q.\Delta t}{2.\pi.e.r^3.C_e} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(c/r)^2}} \cdot \frac{1}{\Delta T_{max}} - \frac{\Gamma_s \rho_s}{C_e}, \qquad (4)$$

avec Ce = 4.184 J/cm$^3$.°C

Si l'on pose $A = Q.\Delta T$, $B = \dfrac{1}{2.\pi.e.r^3.C_e\sqrt{1+(c/r)^2}}$, et $C = \dfrac{\Gamma_s \rho_s}{C_e}$,

la relation (4) s'écrit : $$\theta = A.B.\frac{1}{\Delta T_{max}} - C \qquad (4 \text{ bis})$$

où A ne dépend que des caractéristiques du choc, B de la géométrie du capteur et C des paramètres thermiques du sol.

Cette relation montre que $\theta$ et $\Delta T_{max}$ sont liés par une relation **hyperbolique.**

Ces développements montrent que la mesure de l'humidité volumique par chocs thermiques est **possible** et que la dépendance de $\theta$ et de $\Delta T_{max}$ est **simple.**

### II.3.3. Efficacité de la méthode.

Les essais réalisés par Pouyaud et Chartier ont prouvé que la méthode des chocs thermiques permet la détermination de la teneur en eau, dans la mesure où les deux tiges sont rigoureusement parallèles. En effet, la mesure est très sensible aux variations de l'écartement r des tiges.

Sur le terrain, il est très difficile de réaliser cette condition, et d'obtenir des valeurs représentatives. De ce fait, la méthode n'est pas utilisable avec de tels capteurs. Cela s'est confirmé lors de mesures in-situ réalisées en Centrafrique par des hydrologues de l'ORSTOM,

La méthode est séduisante, tant par sa facilité de mise en oeuvre que par le coût peu élevé de l'instrumentation. Il est donc nécessaire de revoir la conception des sondes et de leur donner une bonne stabilité mécanique.

Pour y parvenir, B. Pouyaud a proposé de supprimer les tiges "parallèles" et de remplacer l'élément chauffant rectiligne par une spire de petit diamètre. La mesure de la température est faite en un point donné de l'axe de la spire (fig. II.5. ci-contre).

# TROISIEME PARTIE

## DEVELOPPEMENT DE SONDES A ELEMENT CHAUFFANT CIRCULAIRE

Les études visant à évaluer la fiabilité de tels capteurs se décomposent en trois parties.

Dans un premier temps, nous développerons un modèle mathématique simplifié qui simule le fonctionnement de ces capteurs. Nous établirons en particulier la relation liant la teneur en eau aux autres paramètres du milieu.

Puis, on cherchera à valider ce modèle en le confrontant au comportement expérimental des capteurs.

La dernière phase de tests concerne l'aptitude de l'appareillage mis au point à la mesure de la teneur en eau des sols.

## III.1. Modèle mathématique simplifié.

Le développement des équations se fait moyennant certaines hypothèses simplificatrices. Des tests sur les capteurs permettront de vérifier que l'on reste dans leur domaine de validité.

Les hypothèses de départ sont les suivantes :

* le sol est considéré comme un milieu **homogène, isotrope, infini;.**

* les paramètres thermocinétiques du sol sont supposés **constants** dans le temps et **indépendants** de la température, hypothèse réaliste au vu des conclusions de la partie II.1.2.;

* la section de la spire chauffante est supposée **infiniment petite**;

* la sonde a une **inertie thermique faible.**

Rappel des notations utilisées :

a : diffusivité thermique du milieu [$m^2/s$],
$\lambda$ : conductivité thermique [W/m.K],
$\Gamma$ : chaleur spécifique du sol [J/g.K],
$\rho$ : masse volumique du sol [$g/cm^3$],

C : capacité calorifique volumique du sol [$J/cm^3.K$].

$T_o$ : la température initiale du milieu, uniforme.

L'expression de la température en un point du milieu échauffé par la spire est solution de l'équation de la chaleur qui s'écrit:

$$\frac{\delta^2 T}{dx^2} + \frac{\delta^2 T}{dy^2} + \frac{\delta^2 T}{dz^2} = \frac{1}{a}\frac{\delta T}{dt}$$

Carslaw and Jaeger (Conduction of Heat in the Solids) on montré que les solutions de cette équation sont de la forme:

$$T = \frac{Q}{\Gamma\rho(4\pi at)^{3/2}} \cdot e^{-((x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2)/4at} \qquad (5)$$

C'est l'expression de la température générée en un point (x,y,z) d'un solide par un source ponctuelle instantanée de chaleur localisée en (x',y',z') qui dissipe la quantité de chaleur Q.

Considérons pour notre problème une source ponctuelle instantanée localisée au point (x', y', z'). En posant $r^2 = (x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2$, il vient:

$$T = \frac{Q}{\Gamma\rho(4\pi at)^{3/2}} \cdot e^{-r^2/4at} \qquad (6)$$

### III.1.1. Source circulaire instantanée.

Soit maintenant une source de chaleur circulaire instantanée de section négligeable et de diamètre R, centrée en (0,0,0) (fig III.1.). On mesure la température en P (0,0,z).

La source élémentaire de longueur $Rd\eta$, produisant à t=0 la quantité de chaleur q par unité de longueur, contribue à élever la température en P de la quantité :

$$T = \frac{qRd\eta}{\Gamma\rho(4\pi at)^{3/2}} \cdot e^{-r^2/4at} \qquad (7)$$

avec $r^2 = R^2 + z^2$

En intégrant sur la spire, il vient:

$$T(r) = T_0 + \frac{2\pi Rq}{\Gamma\rho(4\pi at)^{3/2}} \cdot e^{-r^2/4at} \qquad (8)$$

C'est la température en P produite par une source circulaire instantanée émettant la quantité de chaleur q à t=0, dans un milieu à température initiale $T_0$.

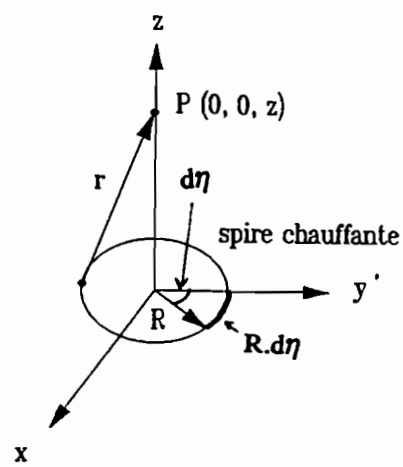



Fig. III.1.

### III.1.2. Source circulaire continue.

Soit une spire dissipant la quantité de chaleur Q par unité de temps et de longueur. En intégrant (4) par rapport au temps, il vient:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{2\pi RQ}{\Gamma\rho(4\pi a)^{3/2}} \cdot \int_0^t e^{-r^2/4a(t-t')} \frac{dt'}{(t-t')^{3/2}}$$

Posons $u = \frac{1}{\sqrt{(t-t')}}$, alors :

$$T(r, t) = T_0 + \frac{2\pi RQ}{\Gamma\rho(4\pi a)^{3/2}} \cdot \int_{1/\sqrt{t}}^{\infty} e^{-r^2u^2/4a}\, du$$

et si $v = \frac{ur}{\sqrt{4a}}$, on a:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{RQ}{\Gamma\rho ar\sqrt{\pi}} \cdot \int_{1/\sqrt{4at}}^{\infty} . e^{-v^2}\, dv$$

Or, $\Gamma\rho a = \lambda$ d'où:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{RQ}{r\lambda\sqrt{\pi}} \cdot \int_{r/\sqrt{4at}}^{\infty} e^{-v^2}\, dv \qquad (9)$$

ou

$$T(r, t) = T_0 + \frac{RQ}{2r\lambda}\, \mathrm{erfc}(r/\sqrt{4at}), \qquad (10)$$

où erfc est la fonction complémentaire d'erreur.

Certains auteurs ont utilisé cette relation pour déterminer la conductivité thermique du milieu, à l'aide d'un sonde de géométrie semblable (Somerton W.H et Mossahebi M. 1967).

### III.1.3. Créneau de puissance thermique.

L'équation de la chaleur est linéaire; on peut donc considérer qu'un créneau de puissance thermique correspond à la superposition de deux états: (théorème de superposition).

* état 1: la spire produit la quantité de chaleur Q à partir de t = 0

* état 2: la spire produit la quantité de chaleur -Q à partir de t = Δt

Cela revient à un créneau de puissance thermique de durée Δt et débutant à t = 0 (fig. III.2.).

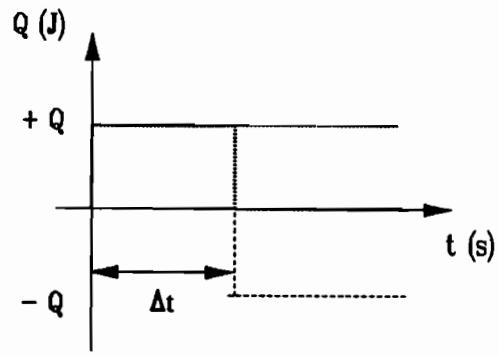



**Fig. III.2. Génération d'un créneau par superposition de deux échelons.**

D'où l'élévation de température en un point à la distance r de la spire:

$$\Delta T(r, t) = \frac{RQ}{r\lambda\sqrt{\pi}} \cdot \left( \int_{r/\sqrt{4at}}^{\infty} e^{-v^2}\, dv - \int_{r/\sqrt{4a(t-\Delta t)}}^{\infty} e^{-v^2}\, dv \right) \qquad (11)$$

### III.1.4. Si $\Delta t$ est petit.

Le choc thermique est assimilé à une impulsion de Dirac[4] et on remplace l'intégrale par sa valeur moyenne.

Il vient:

$$\Delta T(r, t) = \frac{RQ}{r\lambda\sqrt{\pi}} \left( \frac{r}{\sqrt{4a(t-\Delta t)}} - \frac{r}{\sqrt{4at}} \right) . \ e^{-r^2/4at}$$

En factorisant sous les racines par t, et comme $\frac{\Delta t}{t} << 1$, il vient:

$$\Delta T(r, t) = \frac{RQ\ \Delta t}{2\lambda\sqrt{4a\pi}} \ \frac{e^{-r^2/4at}}{t^{3/2}} \qquad (12)$$

où Q est la quantité d'énergie calorifique [J/m.s] fournie par la spire au milieu par unité de temps et de longueur. Si P = U.I. est la puissance électrique dissipée dans la résistance chauffante, on a:

$$Q = \frac{UI}{2\pi R}$$

d'où finalement:

$$\Delta T(r, t) = \frac{UI\ \Delta t}{4\pi\lambda\sqrt{4a\pi}} \ \frac{e^{-r^2/4at}}{t^{3/2}} \qquad (13)$$

---

4. Une impulsion de Dirac est un signal de très grande amplitude et de durée très courte.

$\Delta T(r,t)$ passe par un maximum; en effet la dérivée partielle de (13) par rapport au temps:

$$\frac{\delta T(r,t)}{\delta t} = \frac{UI\ \Delta t}{4\pi\lambda\sqrt{4a\pi}} \cdot \frac{e^{-r^2/4at}}{t^{5/2}} \cdot \left(-r^2/4at - 3/2\right),$$

s'annule pour $t = r^2/6a$.

Sachant que $\lambda/a = C$, on a :

$$\Delta T_{max} = \left(\frac{3}{2\pi e}\right)^{3/2} \cdot \frac{UI\ \Delta t}{Cr^3} \qquad (14)$$

ou :

$$\Delta T_{max} = 0{,}0736 \cdot \frac{UI\ \Delta t}{Cr^3} \qquad (15)$$

### III.1.5. Si $\Delta t$ n'est pas petit.

On ne peut assimiler le choc à un Dirac.

On avait (12) :

$$\Delta T(r,\ t) = \frac{RQ}{r\lambda\sqrt{\pi}} \left(\frac{r}{\sqrt{4a(t-\Delta t)}} - \frac{r}{\sqrt{4at}}\right) \cdot\ e^{-r^2/4at} \qquad (12)$$

La dérivée de cette fonction par rapport au temps s'écrit:

$$\Delta T(r,\ t) = \frac{RQ}{8\lambda a} \cdot \frac{e^{-r^2/4at}}{t^{3/2}} - \frac{e^{-r^2/4a(t-\Delta t)}}{(t-\Delta t)^{3/2}} \qquad (16)$$

Si $t_m$ est une solution de (16), on a:

$$\frac{e^{-r^2/4at_m}}{t_m^{3/2}} = \frac{e^{-r^2/4a(t_m-\Delta t)}}{(t_m-\Delta t)^{3/2}} \qquad (17)$$

On ne connaît pas de solution analytique simple pour cette équation.

On se propose alors de déterminer l'allure de la courbe $\Delta Tmax = F(\Delta t)$, en considérant le comportement de cette fonction à la limite $\Delta t \rightarrow \infty$. Le comportement à la limite $\Delta t \rightarrow 0$ a été étudié ci dessus (cas du Dirac).

Si $\Delta t \rightarrow \infty$, on peut considérer que le signal thermique appliqué au système est non plus un créneau mais un échelon[5]. On est alors ramené à l'équation (10):

$$T(r, t) = T_0 + \frac{RQ}{2r\lambda} \operatorname{erfc}(r/\sqrt{4at}), \qquad (10)$$

La courbe représentative de la fonction $\Delta Tmax = F(\Delta t)$ peut donc être assimilée à une droite de pente $0{,}0736\ U\ I / C\ r^3$ (équation 11) pour $\Delta t$ petit , et à une fonction complémentaire d'erreur pour $\Delta t$ très grand. La figure III.3. ci-contre présente l'allure de cette courbe.

Lors des mesures, il faudra veiller à ajuster les valeurs de $\Delta t$ et de P pour que l'on reste dans la partie "linéaire" de la courbe $\Delta Tmax = F(\Delta t)$.

5. Un échelon peut être considéré comme un créneau de durée infinie.

### III.1.6. Mesure de la teneur en eau.

En II.3.2., on a établi la relation (3), rappelée ci-dessous, qui lie la chaleur volumique du sol à la teneur en eau :

$$C_h = \Gamma_s \rho_s + \theta C_e \qquad (3)$$

Les relations (11) et (3) donnent alors l'expression de l'humidité volumique en fonction des autres paramètres, avec k = 0,0736:

$$\theta = \frac{k.U.I.\Delta t}{C_e.r^3.\Delta T_{max}} - \frac{\Gamma_s.\rho_s}{C_e} \qquad (18)$$

avec Ce = 4,184 J/cm$^3$.°C.

### III.1.7. Conclusions sur l'étude théorique.

Nous venons de montrer qu'il est possible de déterminer l'humidité volumique d'un sol à partir de l'élévation maximale de température d'un milieu auquel on applique un choc thermique.

La température au temps t, en un point situé à la distance r de la spire chauffante s'exprime par la relation (13) :

$$\Delta T(r, t) = \frac{UI\ \Delta t}{4\pi\lambda\sqrt{4a\pi}} \frac{e^{-r^2/4at}}{t^{3/2}} \qquad (13)$$

Cette fonction est maximale au temps $t = r^2 / 6.a$ et vaut

$$\Delta T_{max} = 0{,}0736 \cdot \frac{UI\ \Delta t}{Cr^3} \qquad (15)$$

On a montré que ces résultats sont valables si la durée Δt du choc thermique est assez brève, c'est à dire si l'on reste dans la zone où la courbe $\Delta T_{max}=f(\Delta t)$ est assimilable à sa tangente.

Enfin, $\Delta T_{max}$ est lié à la teneur en eau par la relation (18):

$$\theta = \frac{k.U.I.\Delta t}{C_e.r^3.\Delta T_{max}} - \frac{\Gamma_s.\rho_s}{C_e}$$

Si l'on pose $\alpha = \frac{k}{C_e.r^3}$, $\beta = U.I.\Delta t$,

et $\gamma = \frac{\Gamma_s.\rho_s}{C_e}$,

(18) s'écrit : $\theta = \alpha.\beta \, . \, 1/\Delta T_{max} - \gamma$, (19)

relation dans laquelle $\alpha$ ne dépend que de la **géométrie du capteur**, $\beta$ des **caractéristiques du choc**, et $\gamma$ des **paramètres thermiques** du sol. On peut remarquer que cette équation est de la même forme que celle trouvée par B. Pouyaud; seul le paramètre "$\alpha$" a une expression différente.

La mise en oeuvre de la méthode consiste alors à déterminer la coefficient $\alpha$ par étalonnage du capteur et le terme $\gamma$ par une mesure calorimétrique. Connaissant la durée et la puissance de chauffe, on peut tracer la droite $\theta=f(1/\Delta T_{max})$, qui donne facilement la teneur en eau volumique pour un sol donné.

Si l'on fait des mesures sur un sol différent, la nouvelle droite d'étalonnage se déduit de la précédente par simple translation sur l'axe des ordonnées, le terme $\gamma$ représentant l'ordonnée à l'origine de la droite (fig III.4.).

Remarque : la relation (18) montre que la teneur en eau est inversement proportionnelle à "r", distance du point de mesure. La mesure est donc très sensible à une mauvaise définition de ce paramètre. Dans la suite, on veillera donc à le mesurer avec précision.

Si la méthode paraît simple, il faut tout de même vérifier expérimentalement la **validité du modèle** et s'assurer en particulier que le terme $\alpha.\beta$ est **indépendant** du type de sol. Ces vérifications sont présentées plus loin.

## III.2. Prototypes de première génération.

La société ARTECH, conformément au cahier des charges défini avec le laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM, a fabriqué deux sondes à élément chauffant circulaire, un boîtier d'émission des chocs et un amplificateur du signal du thermocouple.

### III.2.1. Description

* Les sondes (fig. III.5) sont faites de trois éléments : un corps de sonde en bois de buis, résistant à l'humidité, une résistance chauffante (environ 15 Ω) solidaire du corps de sonde et un tube en laiton, centré sur l'axe de la spire chauffante, et comportant à son extrémité la soudure chaude du thermocouple. Les fils du thermocouple passent à l'intérieur du tube et sont reliés dans le corps de sonde à un câble de compensation (voir annexe 1). Il n'y a pas de soudure froide.

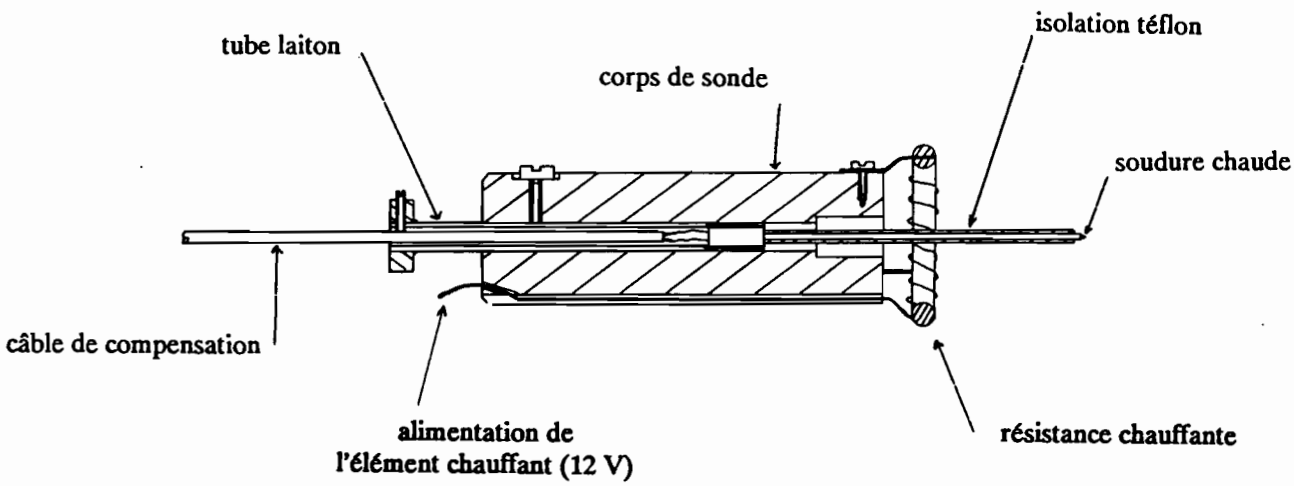



Fig. III.5. Sonde de première génération conçue par ARTECH. Vue en coupe (d'après documents ARTECH).

* L'émetteur de chocs est un boîtier permettant d'appliquer à la résistance chauffante une tension réglable pendant un intervalle de temps variable. Le déclenchement des chocs peut se faire manuellement (bouton poussoir) ou automatiquement à intervalle régulier, réglable.

* L'amplificateur délivre le signal du thermocouple amplifié avec un gain de 100. Il est doté d'une fonction qui calcule l'élévation de température au cours de la mesure, en faisant la différence entre le signal mémorisé au début de la mesure et le signal final.

Pour stocker les mesures, on place en bout de chaine un système d'acquisition de données. Le matériel employé est une centrale **Campbell 21 X.**

### III.2.2. Tests du matériel.

Une première série de tests a été réalisée sur ce matériel, pour évaluer son adéquation avec la méthode des chocs thermiques. Différents problèmes ou imperfections ont été mis en évidence.

#### III.2.2.1. Chaîne de mesure.

Lors de la définition du cahier des charges, les phénomènes d'échauffement du sol ont été supposés relativement brefs (quelques dizaines de secondes). Ils sont en fait plus longs (plusieurs minutes), et le boîtier d'amplification n'était pas adapté à de telles mesures. Les constantes de temps trop faibles du circuit électronique provoquaient des fluctuations importantes dans le signal.

La puissance disponible aux bornes de la spire chauffante et la durée possible des chocs étaient insuffisantes.

Les boîtiers électroniques ont été **modifiés** une première fois pour les adapter aux conditions d'expériences.

#### III.2.2.2 Capteurs.

Les premiers tests visant à vérifier la validité du modèle théorique se sont révélés satisfaisants; on a constaté une variation linéaire de $\Delta T_{max}$ avec la durée du choc $\Delta t$ et la puissance électrique P fournie à la résistance.

On peut d'ores et déjà en déduire que les caractéristiques des capteurs ne sont pas en contradiction flagrante avec les hypothèses du modèle.

Ces résultats encourageants, ont permis de poursuivre les études et de revoir la conception des capteurs, encore trop **imparfaits et fragiles** pour permettre d'évaluer la qualité des mesures.

La conception de deux nouvelles sondes à été menée selon les critères énoncés ci-dessous.

## III.3. Prototypes de seconde génération.

### III.3.1. Conception.

Nous avons pris soin de respecter deux conditions importantes : les perturbations subies par le sol lors de la mise en place des sondes doivent être aussi réduites que possible et le sol ne doit pas s'assécher lors de la chauffe.

Les caractéristiques à respecter sont les suivantes:

#### III.3.1.1. corps de sonde.

Pour améliorer la tenue mécanique de l'ensemble, le corps de sonde sera usiné en un seul tenant. On y prévoit une rainure pour recevoir la spire chauffante et un tube central servant de guide et de support au thermocouple.

Il doit être réalisé dans un matériau de bonne résistance mécanique facile à usiner, résistant à la chaleur (nécessaire au voisinage de la spire), mais mauvais conducteur de la chaleur (éviter les courts-circuits thermiques, tant que possible).

Le Céloron (tissus bakélisé) réunit ces qualités. Deux éléments ont été usinés dans ce matériau. On pourra consulter en annexe 3 des fiches techniques détaillant toute l'instrumentation, ainsi que les **planches en couleurs** en annexe 6.)

Pour atténuer les effets d'éventuels ponts thermiques à l'intérieur de la sonde, on a ménagé dans l'un des éléments, une **gorge** séparant la spire du tube (voir annexe 3.1.). La taille et la dimension de cet évidement sont destinés à limiter les fuites de chaleur vers le corps de sonde.

Ces deux précautions visent à éviter la diffusion de chaleur à l'intérieur du matériau, qui pourrait échauffer certaines parties et fausser la mesure. Leur efficacité sera discutée plus loin. On peut cependant prévoir que cette gorge pourra constituer un **piège à eau**, sur le terrain en particulier. On prendra donc soin de la remplir d'un bon mastic isolant thermique.

#### III.3.1.2. spire chauffante.

De section négligeable et de diamètre environ 30 mm, elle doit avoir une résistance de 15 Ω environ qui ne varie pas avec la température. On choisit pour cela un fil résistif Nickel-Chrome de résistance linéique 45 Ω/m, qui a une bonne tenue en température. La spire est constituée de 30 cm de fil, isolé par un film de résine époxy, lové sur un gabarit et rigidifié avec la même résine.

III.3.1.3. Thermocouple.

Le fil thermocouple retenu est un fil Cuivre-Constantan, d'un gain théorique de 40 $\mu$V/°C. La soudure chaude est placée à l'extrémité du tube, la soudure froide trempe dans un bain d'eau à température constante. On relie le thermocouple au boîtier amplificateur par un câble blindé, afin d'éviter les interférences avec des phénomènes parasites, d'effets non négligeables compte-tenu des courants très faibles mis en jeu.

**III.3.2. Tests visant à évaluer le comportement des capteurs.**

Plusieurs tests ont été réalisés pour évaluer les caractéristiques des capteurs et pour vérifier qu'ils ne trahissent pas les hypothèses du modèle mathématique.

III.3.2.1. Etalonnage des thermocouples.

Ce test rapide est destiné à vérifier le gain de 40 $\mu$V/°C donné dans les tables pour ce type de thermopile. On mesure la tension $V_{tc}$ aux bornes du thermocouple lorsque la soudure chaude est plongée dans des bains à différentes températures, la soudure froide étant à 0 °C.

Les points expérimentaux se disposent sur une droite passant par l'origine (figure III.6.), et pour T=25 °C, on a $V_{TC}$ = 1 mV, ce qui signifie que la pente de la droite $V_{tc}$ = f(T) est égale à la pente théorique.

III.3.2.2. Tenue de la résistance en température.

Ce test vise à vérifier si la valeur de la résistance électrique de la spire est constante au cours de la chauffe. On mesure à intervalles réguliers le courant traversant la spire et la tension à ses bornes pendant un créneau de tension de longue durée (4 minutes). On en déduit la valeur de la résistance au cours du temps.

Les points expérimentaux sont présentés sur la figure III.7. On constate que la résistance est quasiment invariante pendant un choc thermique. La puissance électrique dissipée, et donc la quantité de chaleur fournie au milieu est constante durant la chauffe.

A noter que les très légères fluctuations peuvent être dues aux incertitudes sur la mesure de U et de I.

### III.3.2.3. Température de chauffe.

Il est important de connaître la gamme de températures que peut couvrir la spire chauffante, pour ajuster la puissance et la durée des chocs afin de ne pas dessécher le milieu pendant la chauffe.

Deux mesures, l'une à l'air libre et l' autre dans un sol sec donnent les résultats suivants (puissance de 7 Watts). Ces mesures ont été faites dans des cas particuliers défavorables : l'air diffuse assez mal la chaleur, et par conséquent s'échauffe; un sol sec diffuse moins bien qu'un sol humide. Elles représentent la température maximale atteinte, augmentée de la température de référence (20 °C). On constate que si la durée du choc est inférieure à une minute, la température du sol au voisinage de l'élément chauffant sera de l'ordre de 40 °C, pour un sol sec.

| Matériau | durée du choc | T max (DTmax + 20°C) |
|---|---|---|
| air | 30 s<br>1 min<br>1.5 min | 60 C<br>95 C<br>115 C |
| limon sec | 30 s<br>1 min<br>1.5 min | 25 C<br>45 C<br>60 C |

Lors des mesures, on adoptera des durées de choc inférieures à la minute, de l'ordre de **45 s.**

### III.3.2.4. Allure des thermogrammes, durée des mesures.

La courbe représentant la température en fonction du temps (appelée aussi **thermogramme**) est une courbe en cloche, dissymétrique, avec une montée rapide et une longue traînée. Pour une impulsion thermique donnée, ce graphique renseigne sur la diffusivité thermique du sol : mieux le sol diffuse, plus la traînée sera courte et raide. L'amplitude de la courbe est proportionnelle à la conductivité thermique du milieu.

Le dépouillement d'un thermogramme permet de déterminer la vitesse de propagation du front de chaleur, ainsi que la valeur du temps $t_{max}$ auquel on enregistre $\Delta T_{max}$.

Sur les enregistrements de la figure III.8. (page précédente), on remarque que pour $\Delta t$ = 60 secondes, le front parcourt la distance r (2,5 cm) en 30 secondes, soit une vitesse d'environ 1 mm/s. Le temps de propagation $t_{max}$ est évalué à 3 minutes. Celui-ci varie avec la durée du choc[6], mais est indépendant de la teneur en eau du sol.

La durée d'une mesure (3 à 4 minutes selon les sols) et le temps nécessaire au refroidissement du sol entre deux mesures successives (une demi-heure à une heure) apparaissent dès à présent comme des inconvénients de la méthode. Il peut arriver, dans certains sols, que l'intervalle de temps nécessaire entre deux mesures soit du même ordre de grandeur que la variabilité temporelle du phénomène étudié (déplacement d'un front d'humectation,...). Ce sera une des limites de la méthode.

### III.3.2.5. Reproductibilité des mesures.

Il est nécessaire de connaître la précision avec laquelle nos sondes mesurent des températures. Pour cela, nous avons fait 41 mesures **consécutives** de $\Delta T_{max}$ sur un même sol pour des chocs thermiques identiques[7]. La distribution des valeurs obtenues est représentée sur la figure ci-contre.

On a représenté en abscisse des classes d'amplitude 0.002 °C et en ordonnée les fréquences correspondantes. La distribution obtenue peut en première approximation être assimilée à une distribution de **Gauss.**

Le second graphique ci-contre présente la répartition des valeurs en fréquences cumulées. On constate que 95 % des mesures sont comprises entre 0,504 et 0,524. La **moyenne** de la distribution est égale à **0,516 °C.** L'intervalle de confiance à 95 % sur l'estimation de $\Delta T_{max}$ a donc une **amplitude** de **0,020** °C, soit **+ ou - 2 %** de la valeur moyenne.

Les valeurs de $\Delta T_{max}$ obtenues lors des essais ultérieurs sont comprises entre 0,2 et 1,5 °C. On en conclut que les sondes peuvent estimer le **centième de degré** avec une bonne précision.

---

6. On peut montrer qu'à la limite inférieure (quand $\Delta t$ tend vers 0), $t_{max}$ vaut $r^2/6a$ et que pour $\Delta t$ très grand, $t_{max}$ est peu différent de $\Delta t$.

7. Le refroidissement du sol est achevé au moment des mesures.

III.3.2.6. Mise en évidence d'éventuels ponts thermiques.

Des phénomènes de court-circuits thermiques ne peuvent être à priori négligés, même si certaines précautions ont été prises lors de la conception des capteurs. Ils sont la cause d'erreurs systématiques de mesures; il importe donc de les mettre en évidence, au moins qualitativement, et d'évaluer leurs origines pour trouver un moyen de s'en affranchir. On examinera également à l'intérêt de la gorge ménagée dans le corps de la sonde 1.

*a) Première Expérience*

Dans une première expérience, on mesure simultanément la température de la soudure chaude de la **sonde 2** par le thermocouple associé à la sonde et par un thermocouple externe, traversant le sol et aboutissant au même point (fig. III.9.).

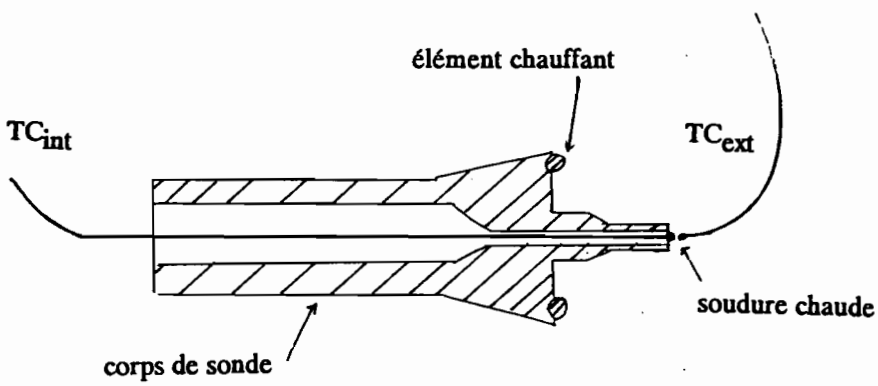



Fig. III.9. Dispositif utilisé pour la mesure de température par thermocouple interne et externe. Sonde 2, vue en coupe.

La figure III.10 ci-contre montre les résultats obtenus.

On constate que le signal mesuré sur le thermocouple externe, repéré $TC_{ext}$ est nettement plus faible et plus lent que celui mesuré par l'intérieur de la sonde ($TC_{int}$). C'est la preuve que le capteur introduit une erreur systématique dans la mesure.

*b) Seconde expérience.*

On mesure à l'aide de thermocouples passant à l'extérieur de la sonde, l'évolution de la température de la soudure chaude d'un point du tube de la **sonde 2** en fonction du temps.

Pour cela, on place un écran en polystyrène sur le tube et un bouchon de terre humide entre l'écran et l'anneau chauffant (fig. III.11.). Ce dispositif vise à atténuer la progression de la chaleur dans la zone des points de mesures, et à limiter l'échauffement en amont de l'écran .On pourra ainsi déceler un éventuel échauffement du tube, qui ne sera pas dû à la propagation de la chaleur dans le sol. On fait aussi une mesure de température sur la face avant de l'écran.

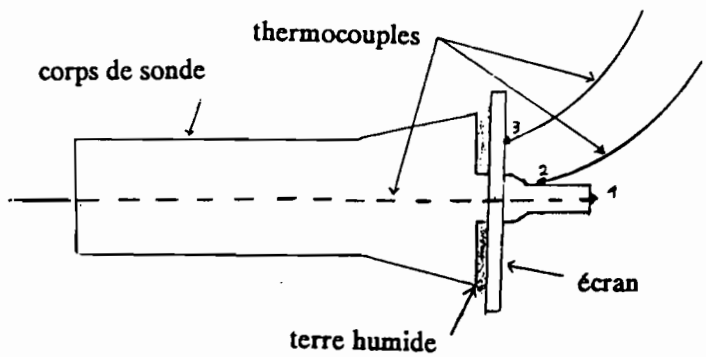



Fig. III.11. Dispositif utilisé sur la sonde 2 pour mettre en évidence les ponts thermiques.

Les courbes obtenues sont présentées figure III.12.

Le signal $T_1$ est très marqué et son maximum vaut environ le **double** de celui de $T_2$. De plus, $T_1$ se propage plus vite que $T_2$, alors que, le point 2 étant situé plus près de l'anneau chauffant, le signal $T_2$ devrait apparaître plus tôt. Le signal $T_3$ est un contrôle de température.

En examinant ces courbes, on peut émettre une hypothèse sur la cause des perturbations thermiques. Le fait que $T_1$ soit supérieur à $T_2$ pourrait s'expliquer par un phénomène de propagation de chaleur **le long des fils du thermocouple**, à l'intérieur du tube. L'échauffement, qui se produit v.aisemblablement lors du passage des fils au voisinage de la spire chauffante, se propage plus vite que dans le sol et amplifie $T_1$.

Un essai similaire à été réalisé sur la **sonde n°1**, qui comporte une gorge isolant le tube de l'anneau chauffant (annexe 3). Les graphes obtenus montrent (fig. III.13.) que les signaux $T_1$ et $T_2$ sont du même ordre de grandeur.

Même si les conditions ne sont pas exactement les mêmes dans les deux cas, comme le montrent les valeurs de $T_3$, les tendances très nettes prouvent que les deux capteurs ne fonctionnent pas de manière identique. L'échauffement parasite est moins important pour la sonde 1, et donc la température mesurée est plus proche de la valeur réelle.

*c) Conclusion.*

On vient de démontrer expérimentalement que la mesure de température faite par la sonde est entachée d'une erreur systématique, vraisemblablement due à des phénomènes de court-circuits thermiques à l'intérieur du capteur. Cette erreur peut être atténuée si l'on ménage une gorge isolante entre le tube et l'élément chauffant (voir sonde 1).

*d) Conséquences.*

Il convient à présent d'évaluer les conséquences de ces phénomènes sur la mesure de teneur en eau.

En première approximation, on peut supposer qu'il existe une relation linéaire entre la température mesurée par une sonde, notée $T_m$ et la température réelle du milieu, $T_r$. L'examen de la relation liant le signal $TC_{int}$ au signal $TC_{ext}$ valide cette hypothèse. On pose alors :

$$T_r/T_m = \eta\,, \quad \text{avec } \eta < 1.$$

La relation liant la teneur en eau et la température mesurée, établie en III.1. s'écrit:

$$\theta = \alpha \;.\; \beta \,.\, 1/\Delta T_{max} - \gamma$$

où $\alpha$, $\beta$ et $\gamma$ sont des paramètres dépendants du capteur, du choc et du sol (on anticipe ici sur le paragraphe suivant où l'on montre que le comportement expérimental des capteurs n'invalide pas ce modèle théorique.)

La teneur en eau déduite de la température mesurée dans le milieu $T_m$ s'écrit :

$$\theta_m = \alpha \,.\, \beta \,.\, 1/\Delta T_{m\,max} - \gamma$$

c'est à dire :

$$\theta_m = \alpha \,.\, \beta \,.\, (\eta/\Delta T_{r\,max}) - \gamma$$

ou encore :

$$\theta_m = (\alpha\beta.\eta) \,.\, 1/\Delta T_{r\,max} - \gamma$$

d'où :

$$\theta_m = \eta.\theta_r \quad \text{avec } \eta < 1.$$

Cette dernière relation montre que les capteurs sous-estiment la teneur en eau du sol. Lors de l'étalonnage, la pente des droites obtenues sera **inférieure** à la pente théorique que l'on obtiendrait si l'on avait une mesure réelle de la température.

En pratique, toute sonde sera donc soumise à une **dérive** consécutive aux ponts thermiques, mais celle-ci sera **prise en compte dans l'étalonnage.** Ces phénomènes n'auront donc pas de grosses conséquences.

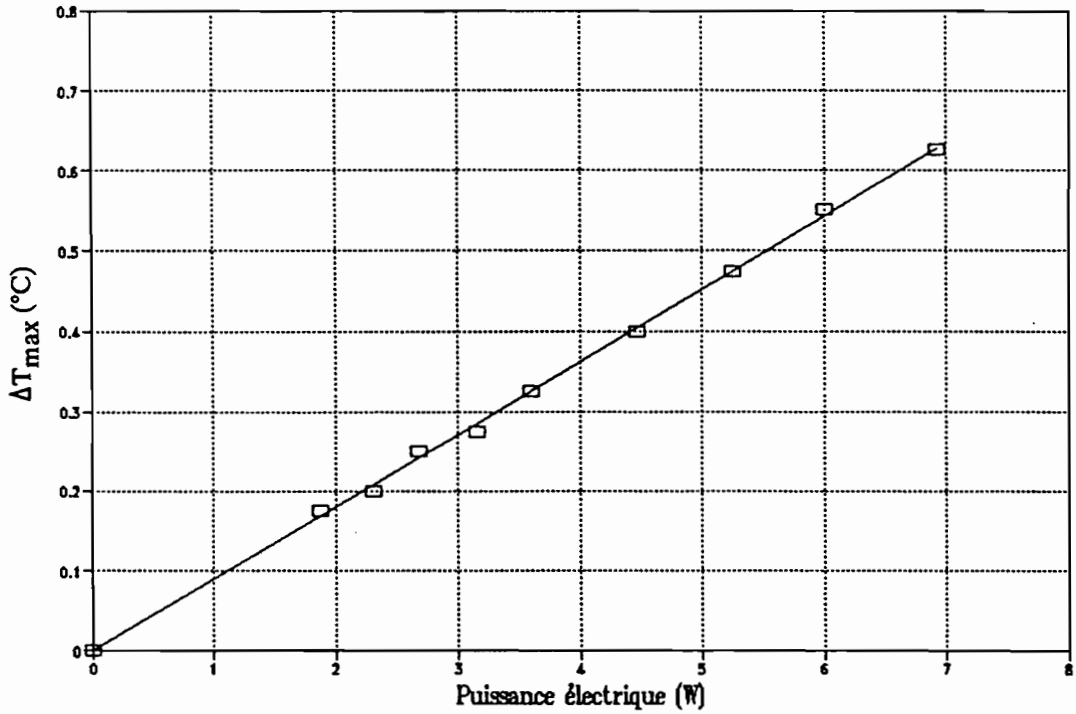



Fig. III.14. Evolution de $\Delta T_{max}$ en fonction de la puissance électrique dissipée par la résistance. Points expérimentaux et droite de régression.

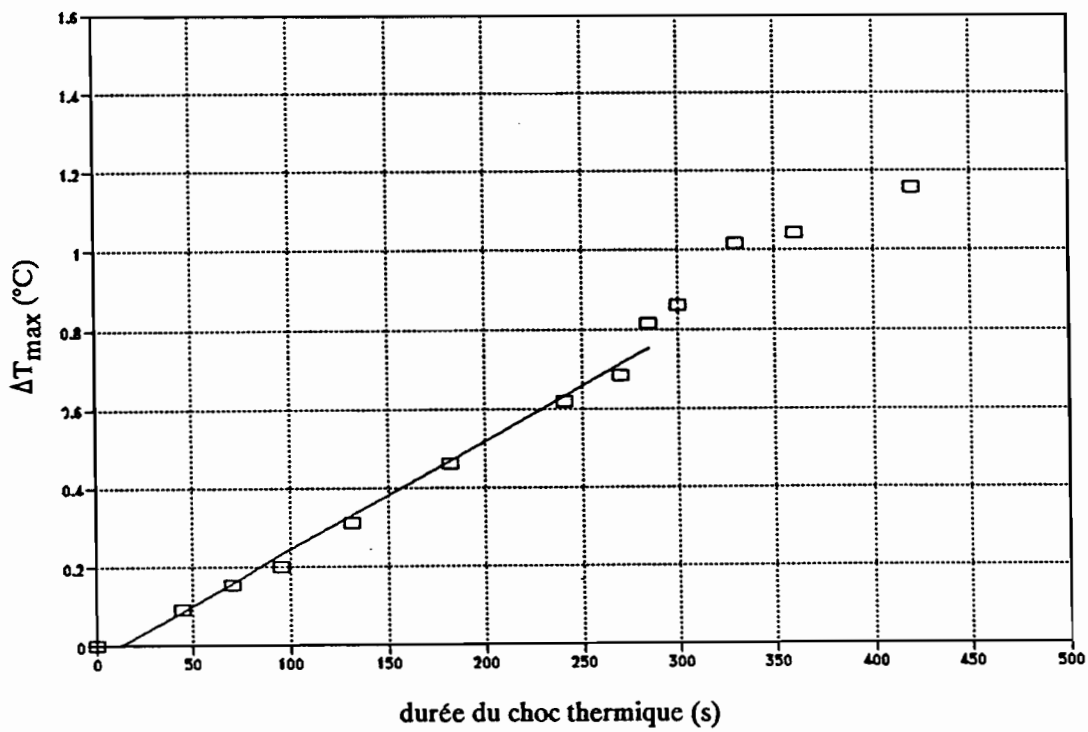



Fig. III.15. Evolution de $\Delta T_{max}$ en fonction de la durée $\Delta t$ des chocs thermiques. Points expérimentaux et droite de régression

### III.3.3. Vérification expérimentale du modèle théorique

On a montré en III.1. que l'élévation maximale de température du milieu était reliée aux autres paramètres par la relation (15):

$$\Delta T_{max} = 0{,}0736 \cdot \frac{U.I.\Delta t}{C.r^3} \qquad (15)$$

Les essais suivants visent à vérifier si le comportement expérimental des sondes est en accord avec cette relation théorique.

#### III.3.3.1. Puissance du choc

On mesure l'élévation maximale de température provoquée dans le milieu par des chocs thermiques de durée constante mais de puissance variable.

La figure III.14 montre que les points expérimentaux sont disposés le long d'une droite, avec une très bonne corrélation.

Dans les essais ultérieurs, on utilisera une puissance de l'ordre de **5 ou 6 Watts**.

#### III.3.3.2 Durée du choc

Pour une puissance donnée (5,9 W), on mesure $\Delta T_{max}$ pour des $\Delta t$ variant de quelques secondes à plus de 9 minutes.

Sur la figure III.15, on constate que la relation $\Delta T_{max} = f(\Delta t)$ est linéaire jusqu'à des durées de l'ordre de 4 minutes. Sur sol humide, la partie linéaire de la courbe correspond à des durées de choc plus faibles.

Quelles que soient les conditions, pour **$\Delta t$ inférieur à une minute**, la courbe est assimilable à sa tangente.

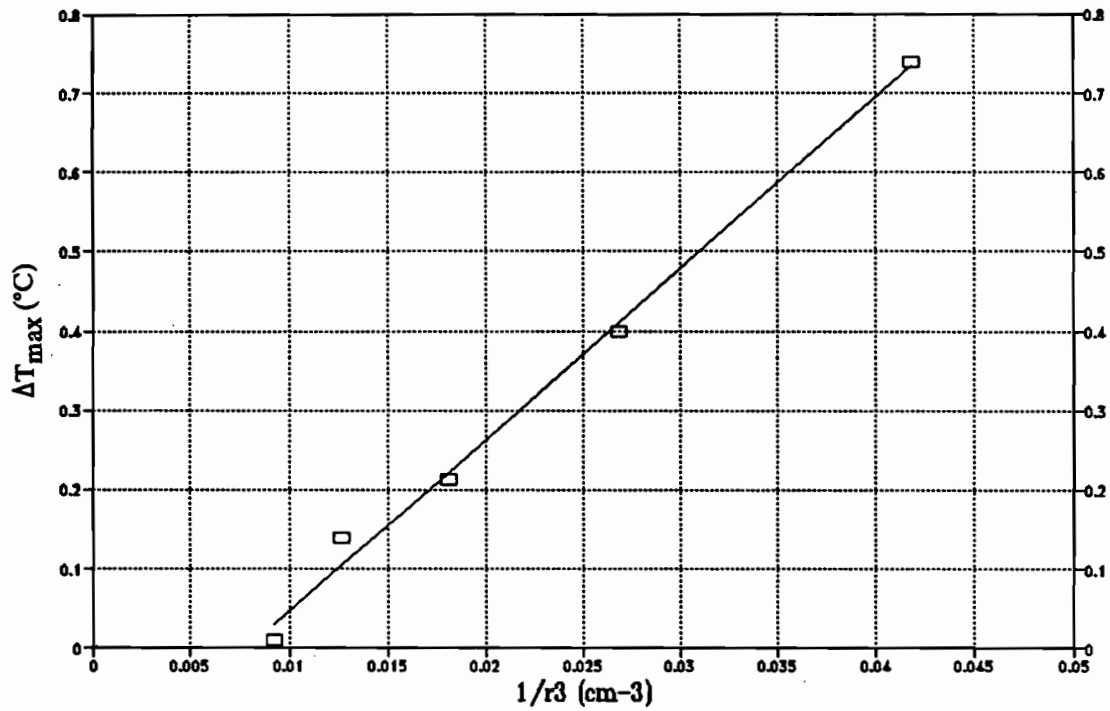



Fig. III.16. Evolution de $\Delta T_{max}$ en fonction de la quantité $1/r^3$ (r : distance à la spire chauffante). Points expérimentaux et droite de régression.

### III.3.3.3. Influence de la distance à la spire chauffante

Dans ce paragraphe, on se propose de montrer que $\Delta T_{max}$ varie avec l'inverse de $r^3$ (r est la distance à la spire).

Les sondes 1 et 2 ont été usinées de telle sorte que la longueur du tube central soit d'environ 5 cm. En le raccourcissant jusqu'à 2 cm par étapes successives, on a pu évaluer, pour un choc donné, l'influence de l'éloignement du point de mesure sur la valeur de $\Delta T_{max}$.

Sur la figure III.16, on constate que les points expérimentaux sont bien alignés. $\Delta T_{max}$ varie donc **linéairement avec 1/r3**. Par conséquent, la mesure de $\theta$ sera **très sensible** aux incertitudes sur r, comme on l'a vu en III.1.7. Ce paramètre devra être déterminé avec soin. Pour la sonde 2, r vaut 2,45 cm, à 5 % près. Du fait de l'épaisseur de la spire, il est difficile d'obtenir une valeur exacte de ce paramètre.

Remarque : la droite de régression ne passe pas exactement par l'origine du fait des incertitudes sur la valeur de r dont on vient de parler.

### III.3.3.4. Test de la relation (15)

Afin de valider complètement la relation (15), on se propose de vérifier si le coefficient k se retrouve à partir des résultats expérimentaux.

On a:

$$\Delta T_{max} = k \cdot \frac{U.I.\Delta t}{C.\, r^3} \qquad \text{avec } k = 0{,}0736$$

Le protocole expérimental est le suivant : connaissant les caractéristiques du capteur (r = 2,45 cm) et la puissance de chauffe (U.I), on enregistre $\Delta T_{max}$ pour différentes durées de choc, cela dans trois milieux de chaleur volumique connue (glycérine, diéthylène glycol, chlorure de sodium). La représentation de $\Delta T_{max}$ en fonction de $\Delta t$ donnera k.

Les deux premiers milieux sont des liquides très visqueux. On suppose satisfaites les hypothèses de **contact parfait** entre la spire chauffante et le milieu, d'une part, et de **conduction pure** d'autre part.

Pour des raisons de délais, les essais n'ont été faits qu'avec la sonde 2, mais les résultats obtenus sont transposables pour l'autre capteur.

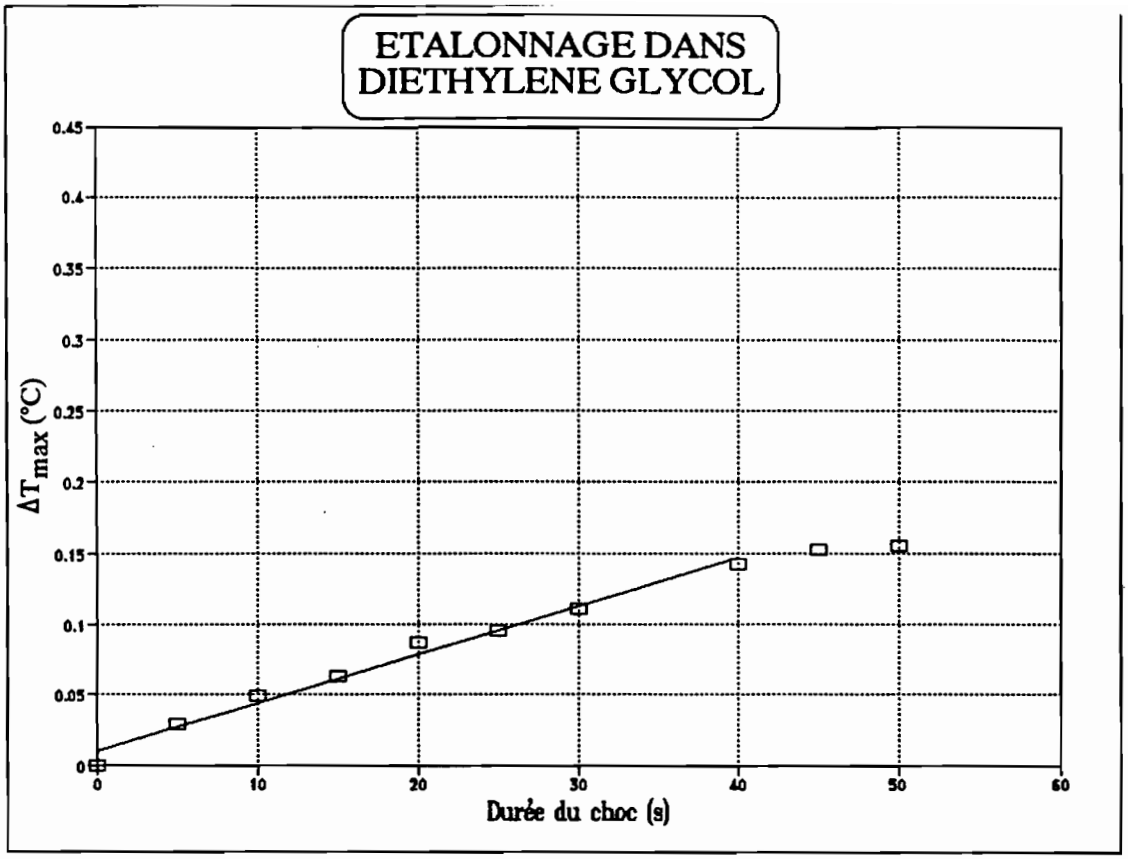



Fig. III.17. Points expérimentaux et droite d'étalonnage obtenus en laboratoire sur un échantillon de diéthylène glycol.

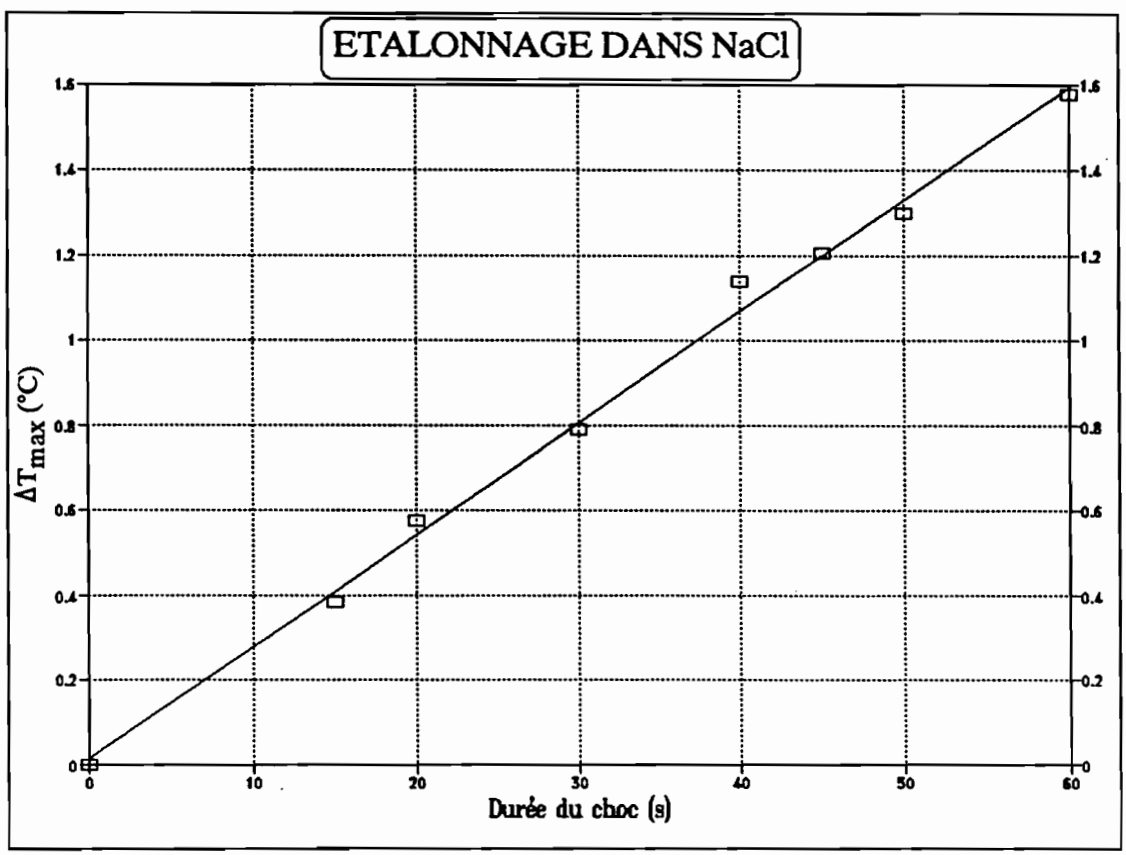



Fig. III.18. Points expérimentaux et droite d'étalonnage obtenus en laboratoire sur un échantillon de chlorure de sodium.

Pour chaque milieu, on calcule la droite de régression du nuage de points. Le coefficient k est calculé à partir du rapport $\Delta T_{max}/\Delta t$ (voir annexe A.4.1.), puis comparé à sa valeur théorique.

On a les relations:

$$k = \frac{\Delta T_{max}}{\Delta t} \cdot \frac{C \cdot r^3}{U \cdot I} \qquad (20)$$

et $k = 0{,}0736$

Les figures III.17. à III.19. montrent que des droites s'ajustent bien sur les nuages de points. Les calculs sont fournis en annexe A.4.1.

Remarque : On n'a conservé pour le calcul des pentes que les points correspondants à la partie linéaire de la courbe $\Delta T = f(\Delta t)$ (voir III.3.3.2.).

Les pentes calculées sont reprises dans le tableau ci-dessous (fig. III.20).

| Milieu | Pente de la droite |
|---|---|
| Glycérine | 0.0755 |
| Diéthylène glycol | 0.0294 |
| Chlorure de sodium | 0.1471 |
| Théorie | 0.0736 |

Fig. III.20. Tableau récapitulatif des pentes des droites d'étalonnage obtenues sur les trois milieux et pente théorique.

| CONDITIONS EXPERIMENTALES | |
|---|---|
| Durée du choc | 45 s |
| Puissance | 5.1 W |
| Sonde | 2 |

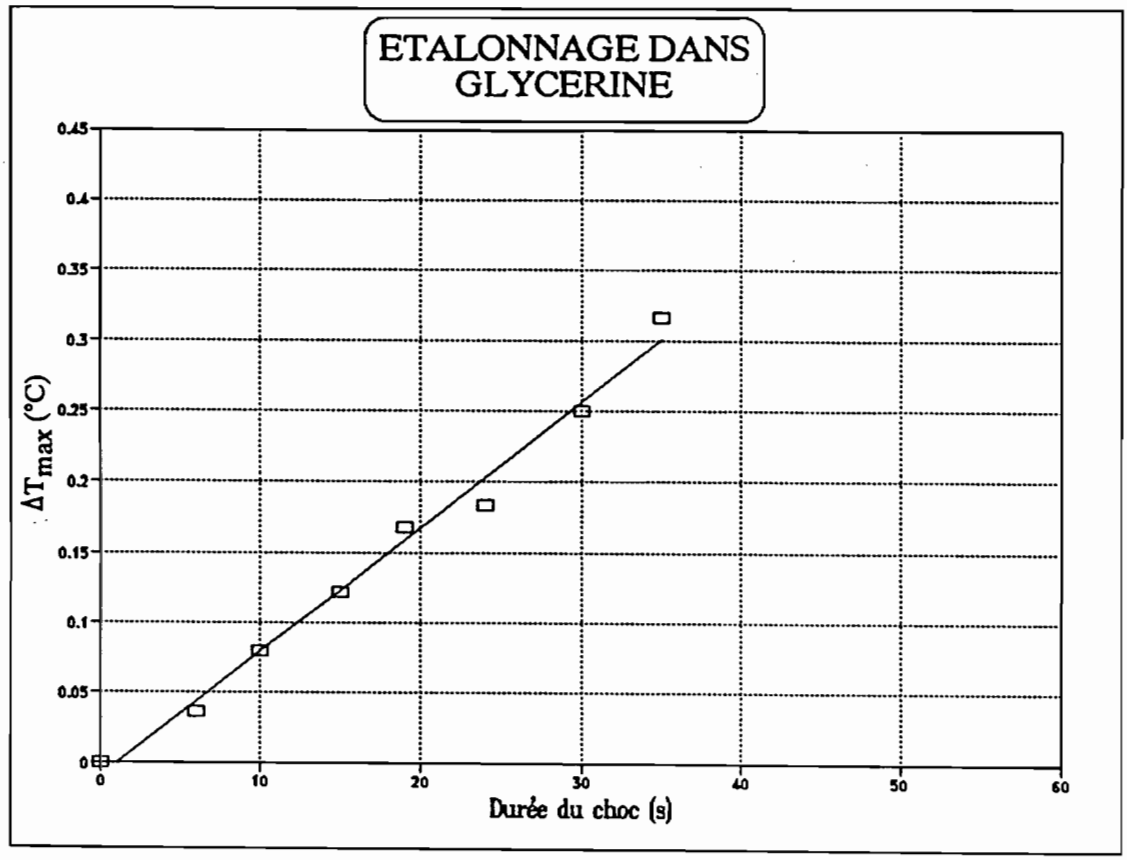



Fig. III.19. Points expérimentaux et droite d'étalonnage obtenus en laboratoire sur un échantillon de glycérine.

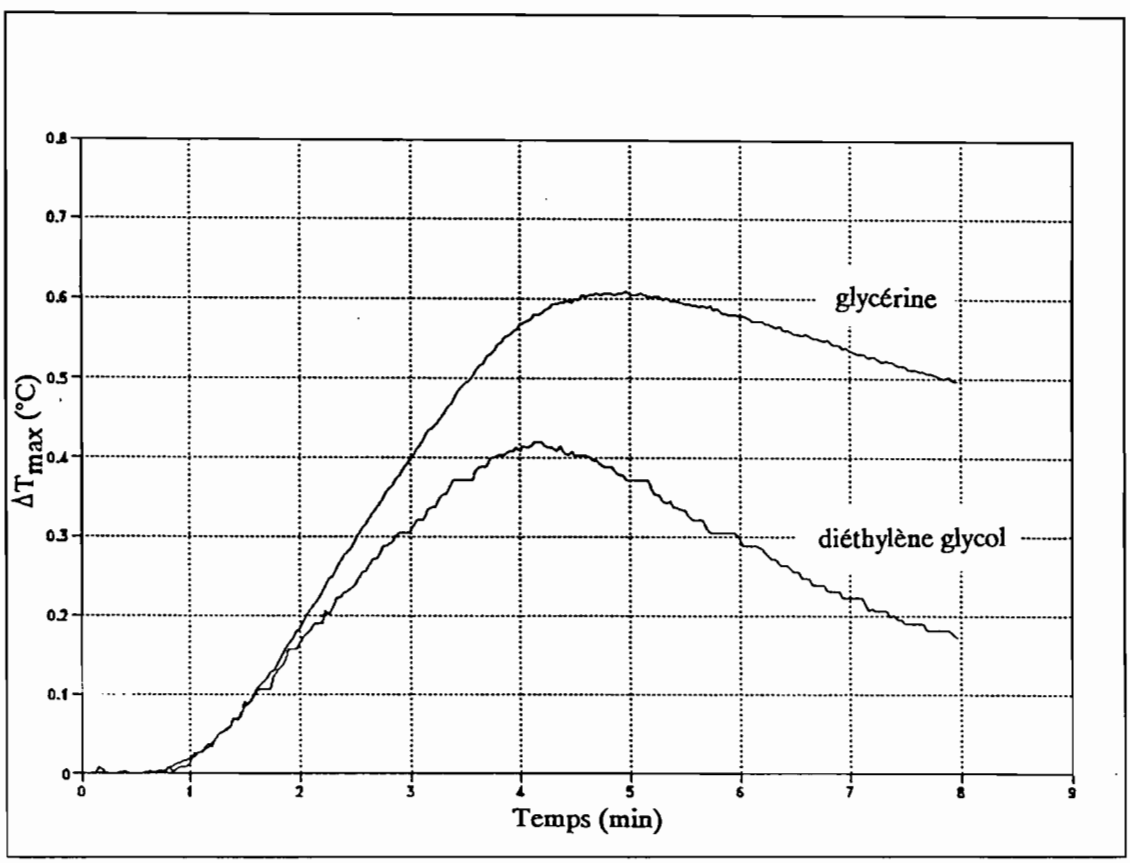



Fig III.21. Enregistrements de l'élévation de température ΔT en fonction du temps dans la glycérine et le diéthylène glycol. Caractéristiques du choc : Δt=3 min. P=5,8 W

On constate que pour le diéthylène glycol ($C_4H_{10}O_3$) et le chlorure de sodium, celles-ci sont très différentes de la pente théorique, alors que pour la glycérine, elle est du même ordre de grandeur. Ces constatations amènent à penser que seule la glycérine satisfait pleinement aux hypothèses mentionnées ci-dessus.

Pour NaCl, comme pour tout solide pulvérulent, l'hypothèse de contact parfait n'est pas parfaitement vérifiée. La quantité de chaleur fournie réellement au milieu est inférieure à celle qui est disponible sur la résistance. D'après la relation (20), la valeur obtenue pour k est alors **supérieure** à la valeur théorique; c'est bien ce qu'on observe expérimentalement.

Pour le diéthylène glycol, l'hypothèse la moins vraisemblable est celle de la conduction pure. La figure III.21 montre deux thermogrammes enregistrés pour le même choc thermique dans ce liquide et dans la glycérine. La courbe de la glycérine est lisse et régulière, mais ce n'est pas le cas pour l'autre. On peut en déduire que la propagation de la chaleur dans $C_4H_{10}O_3$ est perturbée, vraisemblablement par des **phénomènes de convection** dans le liquide. La valeur de k tirée de cet essai est **inférieure** à la valeur théorique.

Ne disposant que de trois points expérimentaux, il n' a pas été possible de vérifier si la relation $\Delta T_{max} = f(1/C)$ est linéaire.

On retire de ces tests deux enseignements principaux. D'une part, le coefficient k calculé à partir des mesures n'est voisin de sa valeur théorique que pour la glycérine. Cet unique résultat ne permet pas de conclure à la totale validité du modèle théorique. Sur des milieux "idéaux" (pas de convection, etc...), on aurait très probablement obtenu une valeur proche de la théorie.

D'autre part, l'hypothèse de contact parfait entre la spire chauffante et un milieu solide n'est pas vérifiée et la mesure de température en est affectée. Une conclusion semblable aurait été obtenue sur l'autre sonde, les ponts thermiques (voir III.3.2.6.) affectant les amplitudes et non les tendances des phénomènes.

III.3.3.5. Synthèse

*a) Conclusion des essais*

Les trois premiers tests mentionnés ci-dessus n'infirment pas les résultats de l'étude théorique. Les caractéristiques du choc et des capteurs font que l'on reste dans le domaine de validité de l'équation (15).

On remarque en particulier que l'hypothèse, peut-être abusive, selon laquelle un choc thermique est assimilable à une impulsion de Dirac n'est pas en contradiction avec l'expérience. On reste effectivement sur la partie linéaire de la courbe $\Delta T_{max} = f(\Delta t)$.

Le dernier test concernant le calcul de k ne permet pas de conclure définitivement à la validité du modèle. Il a simplement permis de mettre en évidence une résistance de contact.

Au vu des résultats des paragraphes III.3.3.1. à III.3.3.3., on peut raisonnablement admettre que le modèle théorique est valable pour les deux capteurs quand la durée du choc reste assez brève. Si cette décision n'est pas totalement justifiée, les étalonnages permettrons de vérifier que la relation $\Delta T_{max} = f(\Delta t)$ est réellement linéaire. De plus, les pentes des droites prennent en compte certaines irrégularités des capteur.

*b) Réalisation des hypothèses du modèle*

* Hypothèses sur le sol

Les hypothèses d'homogénéité et d'isotropie du milieu sont approximativement vérifiées sur des échantillons remaniés de laboratoire. Sur le terrain, leur validité est moins certaine. Cependant, si l'élément de volume représentatif (EVR) du sol en place est suffisamment petit vis à vis de l'élément de volume de mesure (EVM), on peut admettre qu'elles sont vérifiées.

Le volume de sol effectivement concerné par la mesure est un cône dont la base a le diamètre de la spire chauffante, et dont la hauteur est la longueur du tube (fig.III.22.).

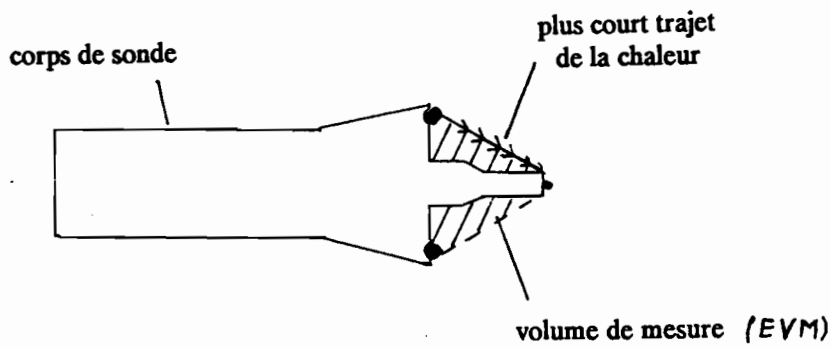



Fig. III.22. Représentation schématique du volume de mesure.

Mais s'il existe au voisinage du cône de mesure une zone moins conductrice, la progression de la chaleur est ralentie et l'accumulation de chaleur dans la zone conique modifie la mesure de température.

En conséquence, on considère que le milieu est infini s'il ne contient aucune discontinuité vis à vis des paramètres thermocinétiques (paroi de récipient, cailloux, racine,...) dans le volume influencé par l'augmentation de température. Celui-ci est défini comme l'ensemble des points dont la température à été modifiée au moment de la mesure, c'est à dire à l'instant où l'on repère la température maximale au bout du tube.

Etant donnés la vitesse de propagation du front de chaleur et le temps de propagation $t_{max}$ , un volume sphérique d'une **dizaine de centimètres de rayon** constitue un milieu infini.

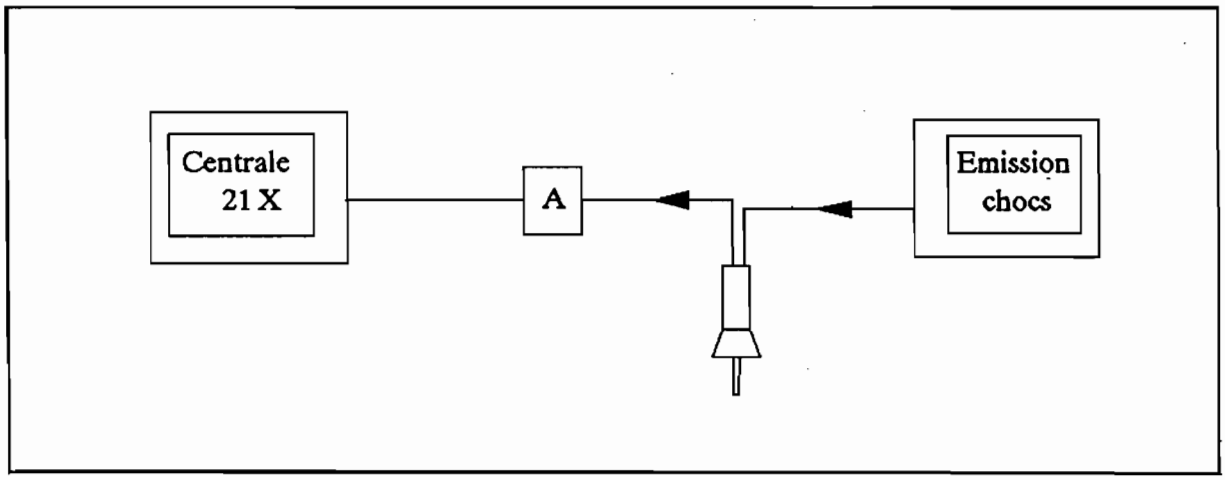



Fig. III.23. Représentation schématique de la chaîne de mesure "1 voie". On reconnait l'émetteur de chocs, la sonde, l'amplificateur (symbolisé par la lettre "A") et la centrale de mesure. Les flèches indiquent le sens de parcours des signaux.

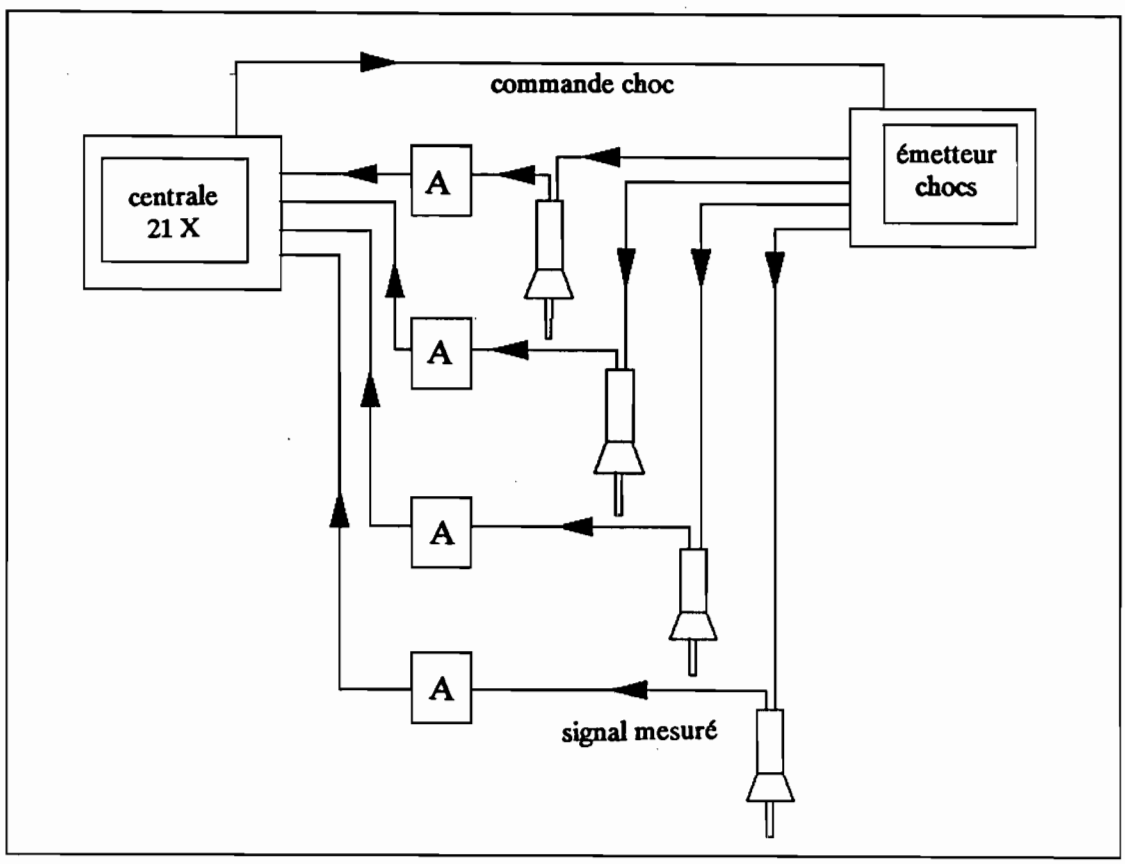



Fig. III.24. Schéma de la chaîne de mesure "4 voies", avec les mêmes symboles que ci-dessus. On remarque le câble qui relie la centrale à l'émetteur de chocs et qui permet le fonctionnement automatique de l'ensemble.

* Hypothèses sur les sondes

On a supposé que l'inertie thermique de la résistance chauffante était négligeable, mais ce n'est certainement pas vérifié. La capacité thermique de la résistance conduit celle-ci à emmagasiner de la chaleur au début du choc, avant de chauffer le milieu. En conséquence, le signal thermique carré appliqué au sol est atténué et la puissance effectivement reçue par le sol est inférieure à la puissance théorique.

### III.3.4. Chaîne de mesures.

#### III.3.4.1. Description.

La chaîne de mesure est constituée d'un boîtier générant les chocs thermiques, d'une ou plusieurs sondes, d'un amplificateur du signal des thermocouples, et d'un système d'acquisition de données.

Deux versions ont été mises au point. La première, conçue avant tout pour les essais au laboratoire, ne permet la mesure qu'avec une seule sonde (fig. III.23 ci-contre).

Le générateur de chocs permet de délivrer un signal en courant, réglable par potentiomètre, pendant un durée variant de **4 à 259** secondes. Le déclenchement du choc peut se faire **manuellement** par un bouton poussoir, ou **automatiquement**, à intervalles réglables.

Le boîtier d'amplification permet d'amplifier les signaux du thermocouple. Afin de limiter les perturbations par des courants parasites, on connecte les sondes avec des câbles blindés. Le gain théorique est de **1000**.

La seconde version, destinée aux essais in-situ, comporte quatre voies, permettant d'utiliser **quatre sondes simultanément**. Elle est prévue pour pouvoir fonctionner automatiquement (fig. III.24 ci-contre). Une vue générale de ce dispositif est présenté en annexe 6, planche n°2, photos 6 et 7.

Le générateur de choc est construit selon le même principe que le premier, mais comporte quatre sorties et un dispositif de réglage du courant disponible sur chacune d'elles. Le déclenchement peut être manuel ou commandé par un **signal délivré par la centrale de mesure.**

Les tests concernant les sondes se sont révélés satisfaisant, comme on l'a montré dans les paragraphes précédents. Pour les étalonnages et les essais de terrain, nous avons construit **deux autres sondes** (sonde 3 et sonde 4), identiques entre elles, mais légèrement différentes des deux premières. Les détails sont présentés en annexe A.3.2 et A.6.1. (photos n° 3 et 4) . Les délais ne permettant pas de refaire les tests complets, on admet que leur fonctionnement est similaire à celui des sondes 1 et 2.

On dispose maintenant de **quatre capteurs**. Pour des raisons de souplesse d'utilisation, on a prévu un boîtier amplificateur par sonde.

L'acquisition des données se fait par une centrale 21 X, distribuée par Campbell Scientifique Ltd. Cet appareil dispose d'un langage de programmation spécifique, qui permet en particulier la mesure de tensions sur 8 voies simultanées, avec un temps de scrutation variable. Le temps de scrutation utilisé était généralement de 2 secondes. Les mesures de tensions sont transformées en mesures de température par l'intermédiaire des courbes d'étalonnage des thermocouples et du gain des amplificateurs (voir III.3.4.2.b) ). On peut également programmer l'émission d'un signal vers l'extérieur, ce qui permet de piloter le déclenchement des chocs.

Les données sont stockées dans la centrale, et peuvent être transférée à tout moment sur un disque de micro-ordinateur, ou sur un bloc mémoire, par l'intermédiaire du logiciel de dialogue PC 208, disponible chez le même fournisseur.

Pour les mesures en laboratoire, la chaîne de mesure a été utilisée en fonctionnement manuel. Le fichier de valeurs correspondant à une mesure est transféré sur micro-ordinateur portable.

Sur le terrain, le déclenchement des chocs est piloté automatiquement par la centrale de mesure, et les valeurs mesurées sont stockées dans un bloc mémoire, plus adapté au transport sur le terrain. Il est déchargé régulièrement sur micro-ordinateur.

### III.3.4.2. Problèmes posés par la chaîne de mesure.

La chaîne à été modifiée à plusieurs reprises (voir III.2), mais dans sa dernière version, il subsiste deux problèmes majeurs.

*a) Parasites.*

Il peut apparaître entre les différents éléments de la chaîne des parasites dus à des capacités électriques occasionnelles.

Des courants (charge ou décharge des capacités) se superposent aux signaux des sondes, et les valeurs mesurées par la centrale ne sont plus représentatives du signal thermique mesuré dans le sol.

Ces phénomènes, facilités par les interconnexions des boîtiers entre eux, apparaissent surtout pendant la phase de chauffe du sol, pendant laquelle un courant circule dans le circuit émetteur-sonde.

Pour limiter ce type de parasites, il faut éviter les interconnexions entre les éléments, par les batteries d'alimentation en particulier. Ainsi, dans la chaîne "1 voie", chaque boîtier a son alimentation propre et les parasites y sont très rares.

Dans l'autre chaîne, où le bouclage du circuit est réalisé par câble reliant la centrale à l'émetteur, les parasites sont fréquents.

La disposition des câbles reliant les boîtiers (boucles, croisements, etc..) influence également la présence de parasites.

*b) Gain des amplificateurs.*

Les amplificateurs sont conçus pour avoir un gain théorique de 1000. En fait, ce gain varie avec la température. Des mesures ont montré qu'en dessous de 70 °C, le gain diminue d'environ 3 points pour une augmentation de la température du boîtier de 10 °C. Au delà de 70 °C, les caractéristiques électriques de l'amplificateur opérationnel[8] ne sont plus garanties. Le gain augmente alors de manière importante. Pour ne pas détériorer les amplificateurs, aucune mesure de la dérive du gain en ambiance très chaude n'a été faite.

En laboratoire, où la température ambiante est relativement constante, ces inconvénients n'apparaissent pas. En revanche, sur le terrain, la température des boîtiers peu dépasser 70 °C s'ils sont exposés longtemps au soleil.

Les fluctuations du gain affectent la mesure. En effet, si v est la tension délivrée par un thermocouple, et si G est le gain de l'amplificateur, la tension mesurée par la centrale est:

$$V = G \,.\, v, \quad \text{exprimée en mV.}$$

Moyennant la pente des thermocouples (40 $\mu$V/°C) et le gain théorique à l'amplification (1000), la conversion en température s'écrit:

$$T = G/1000 \,.\, 0{,}025 \,.\, v \text{ en °C.}$$

Pour la mesure de l'humidité, on avait:

$$\theta = \alpha \,.\, \beta \,.\, 1/\Delta T_{max} - \gamma$$

d'où

$$\theta = \alpha \,.\, \beta \,.\, \frac{1}{G/1000.\, 0{,}025\, \Delta v_{max}} - \gamma$$

Cette dernière relation montre que la **teneur en eau** mesurée est proportionnelle à l'**inverse du gain** des amplificateurs.

Par conséquent, si du fait de la température ambiante, G/1000 est **supérieur** à 1, on **sous-estime** $\theta$.

---

8. composant principal des boîtiers d'amplification.

Ce problème, mis en évidence sur le terrain, n'a été qu'imparfaitement résolu en mettant les boîtiers amplificateurs à l'ombre d'un parasol.

Ces deux imperfections de l'instrumentation de mesure pourront **masquer partiellement** l'efficacité de la méthode des choc thermiques. Si l'on peut corriger les données parasitées (voir ci-dessous), le second type d'erreur est définitif. L'utilisation de l'appareil actuel sera limitée à des températures de boîtiers **inférieures à 50 °C.**

### III.3.4.3. Traitement des données.

Les fichiers bruts provenant de la centrale de mesure ne sont pas exploitables tels quels. Ils nécessitent un traitement qui les transforme en fichiers imprimables. L'option "SPLIT", du logiciel PC 208, permet cette transformation, mais permet également d'effectuer des opérations mathématiques sur les colonnes de chiffres. En particulier, il est possible de déterminer le **maximum** d'une série, qui correspond à la **température maximale** mesurée sur une voie. La température du milieu avant le choc ayant été enregistrée dans le même fichier, il est alors aisé de calculer $\Delta T$.

Dans un fichier "parasité", la séquence contenant les valeurs erronées correspond en général à la phase de chauffe du sol (moins d'une minute). Ces valeurs sont souvent très supérieures à la température maximale mesurable par les sondes. Il faut donc les effacer, sans incidence sur les résultats puisque le maximum de température est mesuré quelques minutes après le début du choc.

Un exemple de traitement d'un fichier brut est donné en annexe 2.

Remarque :

La centrale 21 X est capable de déterminer la valeur maximale mesurée dans un intervalle de temps donné. Le calcul des maxima pourrait donc se faire dès l'acquisition. Nous avons néanmoins choisi de conserver toutes les valeurs brutes, pour avoir une indication du bon fonctionnement (présence ou non de parasites), et pour pouvoir supprimer certaines valeurs manifestement aberrantes, avant le traitement.

## III.4. Etalonnages au laboratoire.

Le but des étalonnages de laboratoire est de déterminer **pour chaque capteur** la valeur expérimentale du paramètre $\alpha$, défini dans la relation (21) :

$$\theta = \alpha.\beta.1/\Delta T_{max} - \gamma.$$

On rappelle que, selon la théorie, $\alpha$ ne dépend que des caractéristiques du capteur à étalonner, $\beta$ de celles du choc et $\gamma$ de celles du sol.

La comparaison des valeurs obtenues pour $\alpha$ sur deux sols de laboratoire et ultérieurement in-situ permettra de vérifier si l'étalonnage est universel, c'est à dire si, pour un choc thermique donné, la valeur trouvée est **indépendante** du type de sol.

### III.4.1. Préliminaires.

#### III.4.1.1. Echantillons de sol.

Les échantillons de sol utilisés proviennent d'un **limon** ("Terre noire", Draix, Alpes de Haute Provence) et d'un **sable** (plage de Carnon, Hérault).

Afin d'avoir une bonne fiabilité dans les mesures, il faut rendre les échantillons homogènes et isotropes vis à vis des caractéristiques physiques du matériau et de l'humidité. L'homogénéité du sol est obtenue par **tamisage** à 3,15 mm. Il faut ensuite réaliser des échantillons couvrant une large gamme de teneurs en eau ( 5 à 40 % environ).

La difficulté principale est d'obtenir une teneur en eau bien homogène dans tout l'échantillon. Des méthodes pour y parvenir ont été mises au point (Horton et coll. - 1982), mais elles ne s'adaptaient pas facilement à nos conditions d'expériences (échantillons de plusieurs kg, pas d'étuve à micro-ondes,...).

On a utilisé une méthode **plus simple** à mettre en oeuvre. Des fines couches de sol sont déposées dans une enceinte, puis humidifiées à l'aide d'un petit pulvérisateur à main. Cela permet de mouiller le sol avec de très faibles quantités d'eau. On veille à humecter chaque couche de la même manière. On laisse ensuite la teneur en eau s'uniformiser sous l'action des gradients de teneur en eau et des remontées capillaires. L'uniformisation est d'autant mieux faite que les couches de sol sont fines.

Cette méthode, qui peut paraître artisanale, a donné de **très bons résultats**.

Pour éviter de perturber les mesures par un **flux de chaleur extérieur**, les échantillons de sol humide sont fabriqués dans une épaisse enceinte de polystyrène, isolant thermique efficace. Les dimensions de la boîte sont suffisantes pour que le milieu soit considéré comme infini.

### III.4.1.2. Protocole de mesure.

*a) Généralités.*

Le mode opératoire est le suivant :

les sondes sont disposées **verticalement**, l'élément chauffant étant légèrement enterré. Les soudures froides trempent dans un récipient empli d'eau, à température constante (voir photo 6, annexe 6, planche couleur n° 2).

Pour avoir une bonne précision sur les valeurs obtenues, on prévoit de faire **trois mesures** par capteur et par échantillon d'où l'on tire une **valeur moyenne** de la teneur en eau "chocs thermiques". Entre deux mesures consécutives, les sondes sont laissées en place. L'humidité volumique et la densité apparente sont déterminées par passage à l'étuve de **deux échantillons de sol** prélevés au cylindre.

Les caractéristiques retenues pour les chocs sont:

$$\mathbf{Dt = 45\ s\ ,\ P = 5\ W}$$

En pratique, des imperfections de l'émetteur de chocs ne nous ont pas toujours permis de respecter ces conditions. Cela n'a pas eu d'incidences puisque l'on a pu mesurer les valeurs effectives de P et $\Delta t$.

On laisse entre deux mesures consécutives un intervalle de temps de 40 minutes à 1 heure selon le sol pour permettre un refroidissement suffisant de l'échantillon.

Remarque : Les étalonnages sont des mesures extrêmement longues, à cause des délais de refroidissement du sol. A titre indicatif, un étalonnage sur **10 échantillons** humides prend **2 à 3 journées.**

*b) Nécessité de corriger les résultats.*

Les mesures sont faites sur des échantillons remaniés, la densité du sol n'est donc pas la même d'une mesure à l'autre. Or ce paramètre influence la chaleur volumique du milieu[9] et par conséquent son échauffement. Pour que les valeurs mesurées soient comparables, il faut apporter une **correction sur ΔTmax** pour se ramener à la valeur que l'on aurait obtenue sur un sol de **même humidité massique** et de densité égale à une **densité de référence**. Le principe de la correction, tiré de Pouyaud et Chartier, 1971, est le suivant :

Soit un échantillon de référence, de teneur en eau pondérale w, de volume V et de densité $\rho_{ref}$. L'échantillon de mesure, de densité $\rho$, a la même humidité massique w et le même volume.

Soient par ailleurs :

Me, $Me_{ref}$ les masses d'eau,
Ve, $Ve_{ref}$ les volumes d'eau,
Ms, $Ms_{ref}$ les masses sèches,
$\theta$, $\theta_{ref}$ les humidités volumiques.

On pose $\kappa = \rho_{ref}/\rho$.

On a les relations:

$$\theta = Ve/V = Me/V \text{ et } \theta_{ref} = Ve_{ref}/V = Me_{ref}/V$$

d'où : $$\theta/\theta_{ref} = Me/Me_{ref} \quad (*)$$

or l'humidité pondérale est la même pour les deux échantillons, d'où:

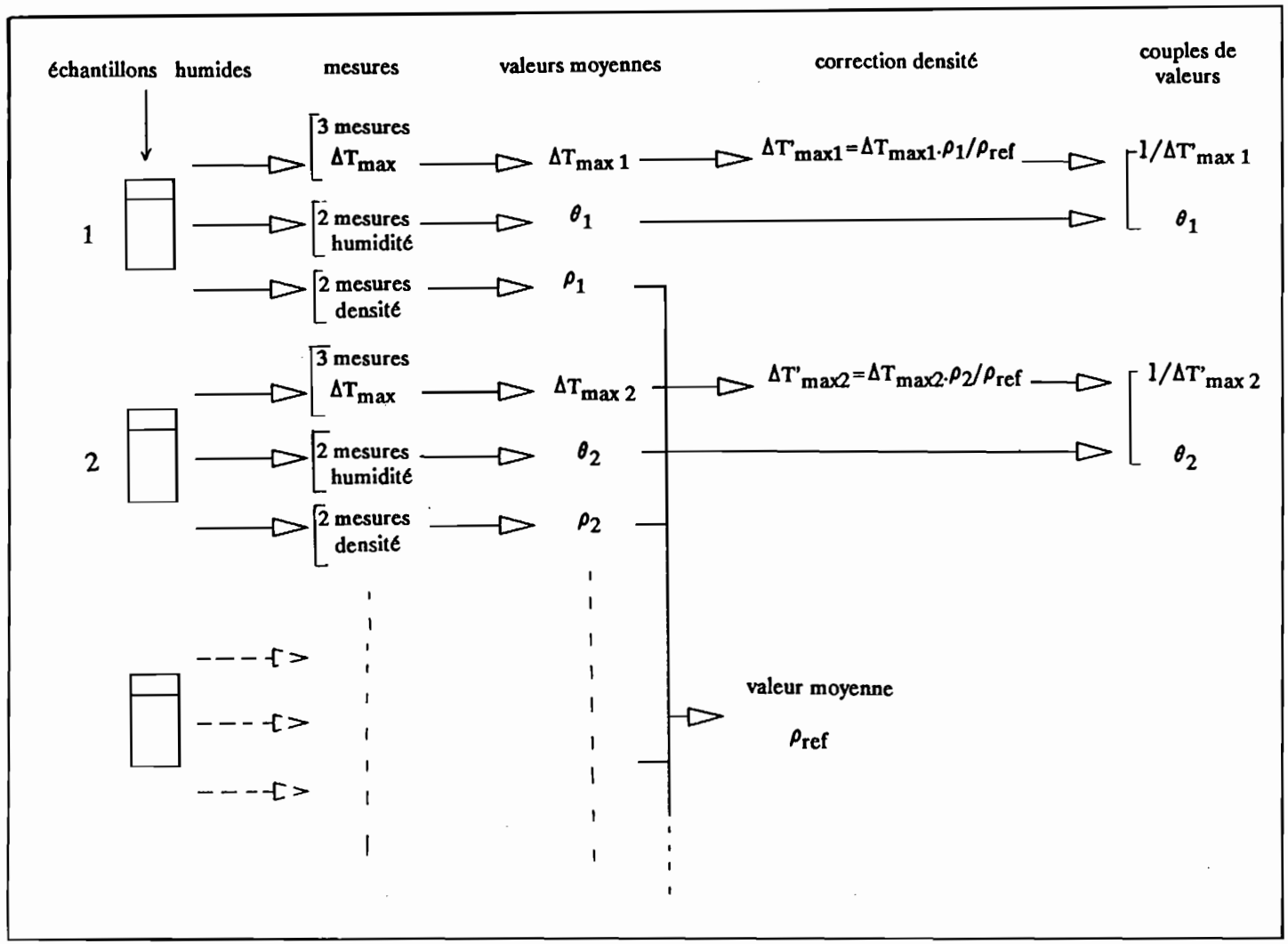
$$Me/Me_{ref} = Ms/Ms_{ref}$$

avec (*), il vient:

$$\theta/\theta_{ref} = Me/Me_{ref} = Ms/Ms_{ref} = (Ms/V)/(Ms_{ref}/V)$$

C'est à dire : $\theta/\theta_{ref} = 1/\kappa$

9. on a la relation $C = \rho\Gamma$




Organigramme présentant les étapes du protocole d'étalonnage en laboratoire.

En III.1. on a montré que l'humidité est liée à la chaleur volumique du sol par une relation du type:

$$\Delta T_{max} = A/C = A/(\rho\Gamma+\theta) \quad \text{(relation (15))}$$

On a alors $$\frac{\Delta Tmax_{ref}}{\Delta Tmax} = \frac{\rho\Gamma+\theta}{\rho\Gamma+\theta_{ref}}$$

c'est à dire : $$\frac{\Delta Tmax_{ref}}{\Delta Tmax} = \frac{1}{\kappa}$$

Cela signifie que les $\Delta T_{max}$ sont dans les **rapports inverses** des densités apparentes.

*c) Protocole de mesure.*

Le protocole de mesure est schématisé dans l'organigramme ci-contre.

On réalise trois mesures de température $\Delta T_{max}$ par échantillon. Outre l'humidité volumique, on calcule pour chacun d'eux la densité sèche, grâce au prélèvement au cylindre. La densité de référence sera prise égale à la valeur moyenne de toutes les densités apparentes mesurées sur un type de sol. Connaissant la valeur de $\rho_{ref}$, on calcule les $\Delta T_{max}$ corrigés ($\Delta T'_{max}$) et leurs inverses. Les couples de valeurs ($1/\Delta T'_{max}$; $\theta$) servent à tracer la droite d'étalonnage.

*d) Exploitation des résultats.*

Les calculs de régression fournissent la valeur expérimentale de la pente de la droite d'étalonnage. Celle-ci est déterminée pour **un type de choc donné**. Le terme constant, qui s'exprime par $c = \rho\Gamma/C_e$ doit également être connu. La valeur de la chaleur spécifique $\Gamma$ du limon et du sable a été déterminée par le Laboratoire de Physico-chimie des Systèmes Polyphasés de l'Université de Montpellier.

On a : pour le sable : **$\Gamma$ = 0,17 cal/g.°C,**
pour le limon : **$\Gamma$ = 0,19 cal/g.°C**

| CONDITIONS EXPERIMENTALES | |
|---|---|
| Sonde | 2 |
| Milieu | Sable |
| Durée du choc | 45 s |
| Puissance | 6.1 W |
| Chal. vol cal/cm3.°C | 0.262 |
| Nombre de points expérimentaux | 12 |
| Gamme d'humidité | 0 à 35,8 % |

| CONDITIONS EXPERIMENTALES | |
|---|---|
| Sondes | 1 à 4 |
| Milieu | Sable |
| Durée du choc | 47 s |
| Puissance | |
| Sonde 1 | 5.1 W |
| Sonde 2 | 4.5 W |
| Sonde 3 | 5.3 W |
| Sonde 4 | 5.1 W |
| Chal. vol. cal/cm3.°C | 0.268 |
| Nombre de points expérimentaux | 3 |
| Gamme d'humidité | 0, 11 et 35 % |

Conditions expérimentales du premier et du second étalonnage sur **sable** en laboratoire.

| | Sable | PENTE CALC. (1) | COEF. COR. (2) | ORD. OR. CALC. (1) |
|---|---|---|---|---|
| premier étalonnage (12 points) | SONDE 2 | 0.427 | 0.92 | -0.298 |
| étalonnage rapide (3 points) | | | (3) | |
| | SONDE 1 | 0.356 | 0.99 | -0.258 |
| | SONDE 2 | 0.334 | 0.99 | -0.255 |
| | SONDE 3 | 0.345 | 0.97 | -0.260 |
| | SONDE 4 | 0.368 | 0.98 | -0.278 |
| | Ordonnée à l'origine théorique | | | -0.262 (4)<br>-0.268 (5) |

Constantes des régressions linéaires calculées sur les échantillons de sable en laboratoire.

(1) : Valeurs calculées en intégrant le point théorique $(0;-\rho\Gamma/C_e)$ au nuage de points expérimentaux.

(2) : calculé sur le nuage expérimental seul. (3) : à titre indicatif.

(4), (5) : Valeurs relatives respectivement au premier et second étalonnage.

Ces valeurs sont garanties à environ 5 % près. Elles sont difficiles à obtenir car les laboratoires ne sont généralement pas équipés pour les mesures calorimétriques sur solides pulvérulents. On peut noter cependant que pour la plus grande partie des sols, $\Gamma$ est compris entre **0,16 et 0,20 cal.g.°C.**

La qualité de chaque étalonnage est évaluée par le coefficient de corrélation calculé sur le nuage de points expérimentaux formé par les couples $(1/\Delta T'_{max}; \theta)$.

Le calcul de la pente de la droite d'étalonnage se fait sur ce nuage de points auquel on **ajoute** le point **théorique** $(0, -\rho\Gamma/Ce)$ avant les calculs de régression, cela pour accroître la précision sur la valeur de la pente. Ce point, qui correspond à l'**ordonnée à l'origine théorique** de la droite est éloigné des autres; il a donc un poids important dans le calcul. Cette opération revient en fait à **caler** la droite d'étalonnage sur un point théorique obtenu grâce au modèle. On a pu vérifier que ce point s'intègre bien au nuage expérimental.

### III.4.2. Etalonnages.

#### III.4.2.1. Etalonnages sur sable.

*a) Conditions expérimentales.*

Pour des raisons de disponibilité de matériel, nous n'avons pu étalonner **complètement** que la **sonde 2.** Afin de disposer de valeurs de pente sur ce sable pour les autres capteurs, nous avons procédé plusieurs semaines plus tard à un étalonnage **rapide** (3 valeurs de $\theta$ seulement) sur les **quatre sondes.** Nous anticipons sur le paragraphe III.4.2.3. en signalant qu'après correction, les pentes obtenues pour la sondes 2 se sont révélées **pratiquement identiques** dans les deux cas. Nous avons alors admis que les droites d'étalonnages calculées rapidement pour les capteurs 1, 3 et 4 étaient **les mêmes** que celles que l'on aurait obtenu par l'étalonnage complet.

Les conditions expérimentales de ces deux séries de mesures sont précisées dans les tableaux ci-contre.

*b) Résultats.*

Les valeurs mesurées par chaque capteur dans les échantillons humides sont corrigées en densité selon la méthode exposée plus haut et l'on détermine les droites de régression des nuages de points ainsi obtenus. Les détails des calculs et les graphiques sont présentés dans les annexes A.4.2. à A.4.4. On n'a reporté dans le tableau ci-contre que les résultats.

Plusieurs remarques peuvent être faites :

* pour le **premier étalonnage**, les points sont bien alignés comme le montrent le graphique et le coefficient de corrélation. On constate que l'ordonnée à l'origine calculée est inférieure à sa valeur théorique. Si l'on retrouve ce résultat dans les autres étalonnages, nous en tirerons les conclusions nécessaires.

* Pour la série d'**étalonnages rapides**, on ne peut rien conclure quant aux coefficients de corrélation, car on ne les a calculés qu'avec quatre valeurs[10]. L'examen des graphes (annexe A.4.3 et A.4.4) montre néanmoins que les points sont assez bien alignés.

Les ordonnées à l'origine des droites calculées ne sont pas toutes inférieures à la valeur théorique . Mais ces résultats sont à traiter avec prudence, du fait du peu de points expérimentaux disponibles. Nous réservons momentanément nos conclusions concernant ce point.

L'examen des pentes obtenues montre qu'elles sont différentes d'un capteur à l'autre, quoique du même ordre de grandeur. Cela n'est pas surprenant puisque la puissance des chocs thermiques était différente d'une sonde à l'autre (voir III.4.1.2.a)) et que de toute façon, celles-ci ne sont **pas strictement identiques**. En revanche, la valeur obtenue pour la sonde 2 dans le premier étalonnage est très supérieure à celle obtenue dans le second cas, mais la comparaison des résultats obtenus lors d'étalonnages différents ne peut se faire que si l'on ramène ceux-ci aux mêmes conditions expérimentales. Ce sera l'objet du paragraphe III.4.2.3.

---

[10]. trois points expérimentaux et un point théorique

| | Limon | PENTE CALC. (1) | COEF. COR. (2) (3) | ORD. OR. CALC. (1) |
|---|---|---|---|---|
| étalonnage complet (6 points) | SONDE 1 | 0.413 | 0.98 | -0.232 |
| | SONDE 2 | 0.416 | 0.97 | -0.246 |
| | SONDE 3 | 0.295 | 0.99 | -0.220 |
| | SONDE 4 | 0.393 | 0.97 | -0.231 |
| | Ordonnée à l'origine théorique | | | -0.206 |

Pentes et ordonnées à l'origine des droites d'étalonnage déterminés sur **limon** en laboratoire.

(1) : Valeurs calculées en intégrant le point théorique $(0;-\rho\Gamma/C_e)$ au nuage de points expérimentaux.

(2) : calculé sur le nuage expérimental seul.

III.4.2.2. Etalonnage sur limon.

*a) Conditions expérimentales.*

Sur ce matériau, les quatre sondes ont été étalonnées complètement. Les conditions sont présentées ci-dessous.

| CONDITIONS EXPERIMENTALES | |
|---|---|
| Sondes | 1 à 4 |
| Milieu | Limon |
| Durée du choc | 45 s |
| Puissance | 6.1 W |
| Chal. vol cal/cm3. °C | 0.206 |
| Nombre de points expérimentaux | 6 |
| Gamme d'humidité | 5,5 à 54 % |

*b) Résultats.*

Les calculs intermédiaires et les graphiques sont joints à l'annexe A.4.5 et A.4.6. Les résultats, repris dans le tableau ci-contre, montrent que :

* comme pour le premier étalonnage sur sable, les corrélations sont très bonnes.

* il y a toujours un écart important et de même sens entre la valeur expérimentale et théorique de l'ordonnée à l'origine. On vérifiera par les essais de terrain si cet écart est systématique.

* les pentes calculées sont du même ordre de grandeur pour les sondes 1, 2 et 4, mais la valeur obtenue pour la troisième est plus faible. Si ce résultat se retrouve dans la suite, nous en étudierons les origines possibles.

## Valeurs brutes

| | Sable | | | | | | Limon | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | étal. complet | | | étal. rapide | | | | | |
| | pente | P | Dt | pente | P | Dt | pente | P | Dt |
| SONDE 1 | | | | 0.356 | 5.1 | 47 | 0.413 | 6.1 | 45 |
| SONDE 2 | 0.427 | 6.1 | 45 | 0.334 | 4.5 | 47 | 0.416 | 6.1 | 45 |
| SONDE 3 | | | | 0.345 | 5.3 | 47 | 0.295 | 6.1 | 45 |
| SONDE 4 | | | | 0.368 | 5.1 | 47 | 0.393 | 6.1 | 45 |

## Valeurs corrigées

| | Sable | | | | | | Limon | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | étal. complet | | | étal. rapide | | | | | |
| | pente | P | Dt | pente | P | Dt | pente | P | Dt |
| SONDE 1 | | | | 0.334 | 5.0 | 45 | 0.341 | 5.0 | 45 |
| SONDE 2 | 0.356 | 5.0 | 45 | 0.355 | 5.0 | 45 | 0.344 | 5.0 | 45 |
| SONDE 3 | | | | 0.311 | 5.0 | 45 | 0.244 | 5.0 | 45 |
| SONDE 4 | | | | 0.345 | 5.0 | 45 | 0.325 | 5.0 | 45 |

Pentes brutes et paramètres des chocs thermiques obtenues sur les sols de laboratoire, et valeurs corrigées.

III.4.2.3. Interprétation des résultats.

Nous allons comparer les résultats précédents en ramenant les pentes calculées aux conditions de référence suivantes :

$$\Delta t = 45\ s \quad \text{et} \quad P = 5\ W$$

Le principe de la correction est le suivant:

Dans l'expression (21) rappelée en III.4., le terme $\beta$ est le produit de la durée $\Delta t$ et de la puissance P du choc thermique. Si $p = \alpha . \beta$ est la pente brute calculée, la pente corrigée $p_c$ s'exprime facilement par la relation:

$$pc = p \,.\, Pref \,.\, \Delta tref / (P \,.\, \Delta t).$$

Le premier tableau ci-contre récapitule les valeurs brutes obtenues sur les deux milieux et le second présente les valeurs corrigées pour les conditions de référence.

On constate que :

* les pentes corrigées sont maintenant du **même** ordre de grandeur d'un milieu à l'autre. En particulier pour la sonde 2, la pente obtenue sur sable est la même pour les deux étalonnages. On admet donc, comme cela a été précisé plus haut, que les valeurs de pente obtenues dans le deuxième étalonnage sur sable sont représentatives des caractéristiques des sondes.

* la tendance selon laquelle la sonde 3 fonctionnerait différemment se confirme. Son coefficient caractéristique $\alpha$ est plus faible que celui des trois autres. On peut attribuer cela à un défaut de fabrication, qui se traduit par une mauvaise efficience de la résistance chauffante. Sa valeur est d'environ 15 $\Omega$, mais la puissance effectivement fournie au sol est **très inférieure** à la valeur théorique. Les hausses de température $\Delta T_{max}$ sont donc inférieures à ce qu'elles devraient être.

Nous disposons, grâce aux expériences ci-dessus, d'un étalonnage de la sonde 3. Même si celle-ci fonctionne mal, la relation $\theta = f(\Delta T_{max})$ est **toujours linéaire** et l'on connaît ses paramètres. Nous utiliserons quand même ce capteur dans la suite, en tenant compte toutefois de ses singularités.

Le tableau ci dessous présente la moyenne et l'écart-type des pentes déterminées en laboratoire.

| | Moyenne | Ecart type % |
|---|---|---|
| SONDE 1 | 0.338 | 1.0 |
| SONDE 2 | 0.352 | 1.6 |
| SONDE 3 | 0.277 | 12.1 |
| SONDE 4 | 0.335 | 3.1 |

Les écart-types, déterminés sur deux et trois valeurs, n'ont pas de signification statistique. Il sont présentés à titre **indicatif** pour donner une **idée** de la précision des étalonnages.

Si pour les sondes 1, 2 et 4, la détermination de la pente semble assez précise, la valeur de 12,1 obtenue pour la troisième implique que l'on devra traiter les données de celle-ci avec prudence.

III.4.3. Conclusion.

En conclusion, on peut faire les remarques suivantes :

* l'estimation des pentes est faite avec une précision qui semble acceptable. On pourra donc définir pour chaque capteur une droite d'étalonnage caractérisée par la **pente expérimentale** relative à un type de choc donné et l'**ordonnée à l'origine calculée** à partir de la chaleur volumique du sol. Il faut vérifier si cette remarque est toujours valable à l'issue des essais de terrain.

* les essais ont permis de déceler dans la sonde n°3, un défaut de fabrication, qui pourra influencer la validité des mesures.

Des conclusions plus nettes auraient pu être données si l'on avait eu d'autres sols et davantage de points sur chaque type de sol. La confrontation aux essais de terrain permettra d'affiner les conclusions.

## III.5. Mesures in-situ.

Après les essais de laboratoire, réalisés dans des conditions supposées idéales, ces tests mettront à l'épreuve la fiabilité de l'instrumentation en conditions plus rudes.

Profitant d'un programme expérimental prévu par M. REVOL, chercheur à la division "Irrigation" du CEMAGREF[11] de Montpellier, et visant à étalonner une sonde TDR[12], les mesures ont pu être faites sur des parcelles irriguées selon un protocole commun. Elles permettent dans un premier temps d'établir les droites d'étalonnage de chaque capteur et de les confronter à celles obtenues en laboratoire. Dans une seconde phase, la méthode des chocs thermiques est comparée à la méthode TDR.

### III.5.1. Etalonnages.

#### III.5.1.1. Préliminaires.

*a) Echantillons de sol.*

Les mesures ont eu lieu sur des parcelles irriguées (asperseurs et goutteurs), sous culture (maïs, soja). Le sol, constitué d'alluvions limoneuses était assez homogène. Toutefois, la couche superficielle nécessitait un petit traitement pour l'aplanir et éliminer mottes et végétaux.

Six sites dans des états d'humectation différents ont été choisis, ce qui a permis de couvrir une large gamme de teneur en eau (3 à 33 %). Les couches de sol 0-5, 5-10 et 10-15 cm correspondaient à des horizons à peu près homogènes vis à vis de l'humidité.

Remarque : Du fait de la durée des mesures et des conditions climatiques (air très chaud, rayonnement solaire direct) qui régnaient ces jours là, l'humidité du sol au moment de la mesure "choc thermique" peut être inférieure de quelques points à celle du sol prélevé à l'arrivée sur le site. Cette différence est toutefois minime face aux incertitudes de mesure.

Le sol en place, de constitution peu différente du limon utilisé en laboratoire, a une chaleur spécifique C de **0,19 cal/g.°C**

---

11. Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Ministère de l'Agriculture.
12. Time Domain Reflectivity. Voir paragraphe I.2.4.

*b) Mode de mise en place des sondes.*

La surface de sol nécessaire aux mesures ne dépasse pas 50 x 50 cm.

Pour les mesures de surface, les sondes sont disposées verticalement, comme en laboratoire: élément chauffant légèrement enterré, et soudure froide plantée le plus loin possible de celui-ci (environ 10 cm).

Pour les mesures en profondeur, on place les sondes dans un trou cylindrique de petit diamètre, en veillant au bon contact sol-élément chauffant, au fond du trou. Ce dispositif est suffisant pour la profondeur maximale des mesures (15 cm).

Afin que le volume de mesure des sondes corresponde bien aux couches 0-5, 5 - 10 et 10 - 15 cm, l'élément chauffant est placé au milieu de chacune d'elles.

*c) Protocole.*

Le protocole suivi sur le terrain est peu différent du protocole de laboratoire. Les distinctions principales résident dans le mode d'acquisition des teneurs en eau et des densités.

Pour chaque site, on a réalisé **deux mesures** à 5, 10, et 15 cm de profondeur, correspondant à trois états humides. Comme précédemment, on en tire une valeur moyenne.

Des prélèvements sur chaque site et à chaque profondeur ont permis de déterminer l'**humidité pondérale** du sol. La densité apparente, nécessaire au calcul de $\theta$, a été mesurée par un **$\gamma$-densimètre de surface**. Cet appareil mesure une densité intégrée sur une tranche de sol, or il nous faut connaître la valeur de $\rho$ pour chaque profondeur. A partir des mesures sur 0 - 5, 0 - 10 et 0 - 15 cm, on a donc estimé les valeurs $\rho_5$, $\rho_{10}$ et $\rho_{15}$, sachant que la répartition verticale de ce paramètre est assez homogène. L'humidité volumique est calculée par le produit $\theta = \rho \, . \, w$

Pour chaque sonde, on réunit les valeurs moyennes de $\Delta T_{max}$ obtenues sur les six sites. La détermination des droites d'étalonnage se fait de la même manière qu'en laboratoire, à partir de ces 18 valeurs corrigées en densité.

*d) Problèmes rencontrés lors des mesures.*

Deux problèmes majeurs, déjà évoqués en III.3.4.2., ont affecté les mesures sur le terrain. Premièrement, des parasites sont apparus dans la chaîne de mesure, principalement pendant la phase de chauffe du sol. Leurs effets ont en général pu être corrigés. Par contre, les fluctuations importantes du gain des amplificateurs, dues aux hautes températures atteintes dans les boîtiers, ont rendu certaines mesures inexploitables.

Le rayonnement solaire direct est à l'origine d'un autre phénomène, mis en évidence sur le terrain. Celui-ci produit dans le sol un flux de chaleur qui, en se propageant, interfère avec celui dû aux chocs thermiques. Ce phénomène, plus marqué en surface (5 premiers centimètres), a faussé certaines mesures.

Avant de procéder au calcul des droites de régression, il a donc fallu s'affranchir de toutes les valeurs aberrantes de $\Delta T_{max}$, introduites par les aléas de la chaîne de mesure.

*e) Traitement préliminaire des données.*

La méthode employée pour détecter les valeurs aberrantes a consisté à représenter graphiquement les nuages de points et à repérer **visuellement** celles qui s'éloignaient fortement du nuage. Cette méthode à été appliquée sans trop de risques dans la mesure où les points aberrants étaient franchement éloignés d'un nuage central assez marqué. On ne dispose plus, au moment de la frappe de ces pages, des documents illustrant cela.

Ces problèmes font qu'on ne dispose plus que d'une **dizaine** de points pour étalonner les sondes.

| CONDITIONS EXPERIMENTALES | |
|---|---|
| Sondes | 1 à 4 |
| Milieu | Limon en place |
| Durée des chocs | 46 s |
| Puissance : | |
| Sonde 1 | 5.2 W |
| Sonde 2 | 4.8 W |
| Sonde 3 | 5.3 W |
| Sonde 4 | 5.1 W |
| Chal. vol cal/cm3.°C | 0.25 |
| Nombre de points expérimentaux : | |
| Sonde 1 | 13 |
| Sonde 2 | 15 |
| Sonde 3 | 15 |
| Sonde 4 | 13 |
| Gamme d'humidité | 3 à 33 % |

Conditions expérimentales de l'étalonnage sur **limon** in situ.

| Limon in-situ | PENTE CALC. (1) | COEF. COR. (2) | ORD. OR. CALC. (1) |
|---|---|---|---|
| SONDE 1 | 0.358 | 0.73 | -0.266 |
| SONDE 2 | 0.335 | 0.61 | -0.254 |
| SONDE 3 | 0.292 | 0.42 | -0.223 |
| SONDE 4 | 0.329 | 0.60 | -0.223 |
| Ordonnée à l'origine théorique | | | -0.250 |

(1) : Valeurs calculées en intégrant le point théorique $(0;-\rho\Gamma/C_e)$ au nuage de points expérimentaux.

(2) : calculé sur le nuage expérimental seul.

Pentes et ordonnées à l'origine des droites d'étalonnage déterminés sur **limon** in-situ.

### III.5.1.2. Mesures, résultats.

Les valeurs mesurées retenues ainsi que les calculs et les graphes peuvent être consultés en Annexe A.5.1 et A.5.2. Les tableaux ci-contre ne présentent que les conditions expérimentales et les résultats.

Les tendances concernant les pentes et les corrélations signalées lors des étalonnages de laboratoire se confirment :

* les coefficients de corrélation sont inférieurs à ceux obtenus en laboratoire, mais restent bons (85 à 90 %). Les conditions expérimentales **moins idéales** (moins bonne homogénéité des paramètres du sol, aléas dans les mesures, ...) expliquent la plus grande **dispersion** des points.

* les pentes calculées sont du même ordre de grandeur pour les sondes 1, 2 et 4. Pour la sonde n° 3, on observe encore une valeur plus faible.

Par contre, les tendances relatives aux ordonnées à l'origine calculées se retrouvent, quoique moins marquées, uniquement pour les sondes 1 et 2. Pour les deux autres, la valeur théorique est inférieure à la valeur expérimentale.

Ces données, trop peu nombreuses **ne permettent pas** de tirer de **conclusion générale**. En l'absence d'autre recours, nous référerons donc à l'étude théorique et lors des mesures ultérieures, nous prendrons pour ordonnée à l'origine la **valeur théorique** issue des mesures calorimétriques sur le sol.

### III.5.1.3. Comparaison aux essais de laboratoire.

Nous cherchons à vérifier que les pentes obtenues sur le terrain sont comparables à celles obtenues en laboratoire.

Les valeurs brutes des pentes sont ramenées aux conditions de référence: $\Delta t = 45$ s et $P = 5$ W.

Valeurs brutes

| LIMON IN-SITU | | | |
|---|---|---|---|
| | Pente | P (W) | Dt (S) |
| SONDE 1 | 0.358 | 5.20 | 46 |
| SONDE 2 | 0.335 | 4.80 | 46 |
| SONDE 3 | 0.292 | 5.30 | 46 |
| SONDE 4 | 0.329 | 5.10 | 46 |

Pentes corrigées

Conditions de référence:
P=5 W Dt=45 s

| | LABORATOIRE | | | TERRAIN |
|---|---|---|---|---|
| | SABLE | | LIMON | LIMON |
| SONDE 1 | | 0.334 | 0.341 | 0.337 |
| SONDE 2 | 0.356 | 0.355 | 0.344 | 0.341 |
| SONDE 3 | | 0.311 | 0.244 | 0.269 |
| SONDE 4 | | 0.345 | 0.325 | 0.316 |

Pentes brutes et paramètres des chocs thermiques obtenues in-situ, et comparaison des pentes corrigées obtenues en laboratoire et sur le terrain.

Les tableaux ci-contre exposent les caractéristiques des chocs utilisés lors des essai in-situ et le tableau comparatif des pentes corrigées, déterminées en laboratoire et sur le terrain.

On constate à nouveau que les pentes sont du même ordre de grandeur. On en conclut qu'il est possible de déterminer expérimentalement une droite d'étalonnage dont la pente, outre les caractéristiques du choc thermique, ne dépend que du capteur. Afin d'attribuer à chaque sonde une valeur caractéristique, on forme la moyenne de toutes les pentes d'étalonnage calculées (voir ci-dessous), et leur écart type.

| | Moyenne | Ecart type % |
|---|---|---|
| SONDE 1 | 0.335 | 0.4 |
| SONDE 2 | 0.349 | 2.1 |
| SONDE 3 | 0.290 | 7.2 |
| SONDE 4 | 0.330 | 4.5 |

Les écarts types, calculés sur quatre (sonde 2) ou trois (autres sondes) valeurs, ne donnent qu'une indication de la dispersion des pentes. Nous ferons les remarques suivantes :

* les capteurs de conception identique (1 et 2, puis 3 et 4) donnent des écart types comparables, ce qui n'est pas étonnant, mais les deux premiers semblent plus précis. De conception plus **fine** que les deux autres, ils semblent **mieux adaptés** à la mesure. Nous rappelons rapidement que les sondes 3 et 4 ont un anneau chauffant d'un diamètre plus grand, et sont munies d'une gorge emplie d'un matériau isolant thermique.

### III.5.1.4. Conclusions.

Concernant les mesures in-situ proprement dites, on a constaté que les nuages de points expérimentaux sont plus dispersés qu'en laboratoire. Ce résultat, prévisible du reste, est imputable aux aléas introduits par la chaîne de mesure d'une part, et d'autre part à la plus grande variabilité spatiale de l'humidité et des caractéristiques du sol

La comparaison avec les essais de laboratoire montre que la pente de la droite d'étalonnage d'une sonde est **indépendante** du milieu de mesure. Pour chaque capteur, on peut donc déterminer un coefficient d'étalonnage constant qui le caractérise. On adoptera pour la suite les valeurs du tableau précedent. Les sondes 1 et 2 sont plus proches du prototype idéal, car mieux conçues que les deux autres.

### III.5.2. Comparaison à la méthode TDR.

#### III.5.2.1. Préliminaires.

De par sa conception, la sonde TDR mesure une humidité moyenne sur une tranche[13] de sol correspondant à la longueur des tiges. Les mesures TDR ont été réalisées sur des tranches de 15 et 30 cm d'épaisseur.

L'étalonnage de la sonde TDR a montré que cet appareil est très fiable, mais qu'un étalonnage est nécessaire. On a une relation du type:

$$\theta_{TDR} = 0.95\,\theta_{étuve} + 6,$$

où les humidités sont exprimées en %.

Les mesures par chocs thermiques ont été faites dans les horizons[14] 5, 10 et 15 cm. Pour comparer les deux méthodes, on calculera l'humidité moyenne sur la tranche 0-15 cm à partir des mesures "ponctuelles" obtenues grâces aux sondes. On établira ensuite la relation "$\theta_{\text{chocs thermiques}} = f(\theta_{TDR})$".

| SITE | TDR | CHOCS THERMIQUES | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | SONDE 1 | SONDE 2 | SONDE 3 | SONDE 4 |
| 1 | 0.154 | 0.060 | 0.132 | 0.064 | 0.060 |
| 2 | 0.314 | 0.259 | 0.267 | 0.176 | 0.204 |
| 3 | 0.277 | 0.156 | 0.214 | 0.131 | 0.129 |
| 4 | 0.374 | 0.275 | 0.299 | 0.204 | 0.189 |
| 5 | 0.199 | 0.093 | 0.114 | 0.107 | 0.067 |
| 6 | 0.244 | 0.167 | 0.222 | 0.183 | 0.225 |

Humidités mesurées par chocs thermiques pour chaque sonde et valeurs d'humidité "TDR" utilisées pour la comparaison des méthodes.

---

13. En l'absence d'autres précisions, on appelle tranche la couche de sol comprise entre la surface et la profondeur considérée.

14. On appelle horizon la couche de sol située au voisinage de la profondeur considérée.

III.5.2.2. Résultats.

Les graphiques présentent en annexe A.5.3. les points expérimentaux et les droites de régression. Les valeurs utilisées sont consignées dans le tableau ci-dessus.

Quelques points sont éloignés du nuage, pour les sondes 3 et 4 notamment. Cela provient du fait que pour certains sites, l'on ne disposait pas des mesures "chocs thermiques" pour tous les horizons, certaines valeurs n'ayant pu être exploitées. Il a donc fallu extrapoler une ou deux mesures ponctuelles à la tranche entière. La valeur ainsi calculée n'est pas nécessairement représentative de l'humidité moyenne sur la tranche.

Néanmoins, nous avons déterminé les régressions linéaires avec ces valeurs extrapolées. Les coefficients de régression calculés pour chaque sonde montrent que les valeurs $\theta$ TDR et $\theta$ chocs thermiques sont **fortement liées.** A noter que pour les sonde 3 et 4, la droite de régression à été calculée sans tenir compte du site n°6, pour lequel la valeur de l'humidité est irréaliste.

III.5.2.3. Conclusion.

On a pu montrer lors de ces derniers tests que les mesures d'humidité par chocs thermiques sont liées aux mesures par la méthode TDR par une relation linéaire. Les corrélations n'ont pas pu être pleinement exploitées du fait du peu de points disponibles et de la fiabilité médiocre des mesures.

On ne peut pas conclure quant à la précision relative des deux méthodes. On se limitera donc à remarquer qu'à l'issue des tests réalisés, elles sont **assez fortement corrélées.**

**III.5.3. Conclusion sur les essais de terrain.**

Les mesures in-situ nous ont tout d'abord permis de vérifier que les hypothèses d'homogénéité et d'isotropie concernant le sol et l'humidité sont plus difficilement satisfaites. Ces facteurs influencent la précision des résultats.

La chaîne de mesure subit de plus des perturbations dues a son caractère expérimental (échauffement des appareils,..), ou à d'autres facteurs (flux de chaleur dans le sol); les mesures en sont également affectées.

Malgré la plus grande dispersion des mesures, on a pu vérifier que le comportement de l'instrumentation, et en particulier des capteurs, était peu différent de celui observé en laboratoire. L'étalonnage des sondes est donc considéré comme **universel.**

La comparaison à la sonde TDR n'a pas permis de conclure de manière nette quant à la précision relative des deux méthodes. Si l'on a mis en évidence une bonne corrélation entre les mesures, des tests employant une instrumentation parfaitement fiable pourraient permettre d'affiner les résultats.

## III.6. Synthèse des résultats.

### III.6.1. Récapitulatif. Principales conclusions.

On peut retenir de cette étude trois grandes étapes. A partir d'un appareillage de mesure provisoire comprenant deux sondes et des boîtiers de mesure, nous avons mis au point, à force de modifications, un modèle fiable de sonde à élément chauffant circulaire.

Afin de simuler le fonctionnement des capteurs, nous avons ensuite développé un modèle mathématique simplifié qui a été confronté au comportement expérimental des sondes. On en a conclu que théorie et expérience étaient en accord.

La troisième phases de l'étude à concerné l'étalonnage des capteurs en laboratoire et sur le terrain, et la comparaison à la méthode TDR . A l'issue de ces étalonnages, nous avons conclu que pour chaque capteur, il était possible de définir une relation du type

$$\theta = \alpha.\beta.1/\Delta T_{max} - \gamma,$$

où $\theta$ est l'humidité volumique à mesurer,
$\alpha$ un paramètre caractéristique du capteur, constant,
$\beta$ un paramètre lié aux chocs thermiques,
$\Delta T_{max}$ l'écart maximal de température mesuré dans le sol par la sonde,
et $\gamma$ un paramètre ne dépendant que de la nature du sol.

Pour un choc et un capteur donnés, la mesure de l'humidité volumique est possible dans la mesure où l'on connaît la valeur de $\gamma$. Nos essais ont permis de déterminer une **valeur moyenne du paramètre** $\alpha$, caractéristique de chaque sonde. Pour

un type de choc et sur un sol donné, la droite d'étalonnage est définie par sa pente égale à $\alpha.P.\Delta t$ et son ordonnée à l'origine égale à l'opposé de la chaleur volumique du sol.

La comparaison avec la méthode TDR a permis de conclure, à défaut de résultat plus précis, que les deux méthodes étaient assez fortement corrélées.

### III.6.2. Commentaires sur l'instrumentation.

A l'issue de cette étude, comme de celles de Pouyaud et Chartier, la méthode des chocs thermiques se révèle intéressante. Les sondes à élément chauffant circulaire que nous avons mis au point ne présentent plus les inconvénients de celles développées par Pouyaud et Chartier.

D'une manière générale, les deux premières sondes (N° 1 et 2) fonctionnent mieux que les deux suivantes (moins de dispersion des résultats). On attribue cela à une conception et un mode de fabrication plus performants. Le modèle en deux partie (une "tête" et un corps de sonde) est intéressant pour des raisons de coût et d'interchangeabilité des parties, mais il mérite d'être testé. La taille plus grosse et la finition moins soignée de l'élément chauffant des sondes n°3 et n°4 est sans doute à l'origine de leur fonctionnement décevant.

Vues les petites dimensions des sondes et la simplicité relative de l'électronique attenante, l'ensemble devrait être disponible pour un prix relativement bas, de l'ordre de 4 à 5000 francs, les capteurs valant quelques centaines de francs.

La miniaturisation des capteurs permet la mesure **ponctuelle** d'humidité, par un procédé qui est **non destructeur** et facilement **automatisable**.

### III.6.3. Conditions d'utilisation.

Nous avons pu évaluer au cours des tests les conditions expérimentales dans lesquelles la méthode est applicable avec le plus de succès.

**) Conditions sur le sol.*

Il est important que le milieu de mesure puisse être considéré comme infini, homogène et isotrope. Pour cela, la **granulométrie** du matériau doit être **faible** devant la dimension du volume de mesure (éviter les discontinuités dans les caractéristiques thermocinétiques), et sa **porosité** la plus **faible** possible (garantir une propagation de la chaleur par conduction). L'espace libre autour des sondes doit être suffisant ( au moins 5 cm).

Les mesures en surface peuvent être perturbées par le flux de chaleur solaire. Elles sont néanmoins possibles par **ciel couvert**, quand l'air n'est pas trop chaud.

*) *Durée des mesures.*

Il faut compter en moyenne **3 à 4 minutes** après le début d'un choc pour mesurer l'écart maximal de température. Selon les sols, le refroidissement nécessaire entre deux mesures consécutives dure **30 minutes à 1 heure.** Les phénomènes à mesurer doivent donc être **assez lents**. Dans certains cas, les délais de mesure peuvent couvrir leur variabilité temporelle (mesures d'infiltration, de dessiccation,...) et condamner l'utilisation de la méthode.

Si ces conditions, parfois restrictives, sont réunies, la méthode des chocs thermiques doit donner de bons résultats.

Remarque importante : Nous avons montré que pour un choc donné, la pente des droites d'étalonnage était la même sur tous les sols. Il faut nuancer cela en remarquant que sur certains sols (très structurés par exemple), la conduction de la chaleur peut être modifiée et par conséquent, le paramètre expérimental $\alpha$ peut être différent.

### III.6.4. Cahier des charges pour une instrumentation performante.

Au cours des diverses manipulations que l'on a pu faire, la chaîne de mesure a révélé ses imperfections. Nous présentons ci dessous un cahier des charges précis pour rendre l'appareillage opérationnel.

Note : lors de ces développements, on se référera utilement aux schémas de l'annexe 3 et aux planches couleurs.

Les principaux problèmes mis en évidence sont les suivants :

* court-circuits et inertie thermiques dans les sondes,
* parasites,
* fluctuation du gain des amplificateurs,
* mauvaise stabilité du terme $UI\Delta t$ (énergie fournie au sol).

*) *Amélioration des sondes.*

Le principe de conception et les dimensions des sondes ne sont pas remis en cause, mais l'utilisation d'autres matériaux pourraient les rendre plus fiables. Nous veillerons cependant à conserver un prix de revient unitaire faible.

Dans les sondes que nous avons réalisées, la capacité thermique de la tête de sonde et la qualité insuffisante des isolants sont à l'origine des court-circuits thermiques, malgré les précautions prises (gorge, etc..). Pour les atténuer, il est nécessaire d'utiliser pour le support de la résistance un meilleur isolant que le tissu bakélisé (Céloron) et de réduire la capacité thermique de l'ensemble, afin de freiner la diffusion interne de chaleur.

Pour réaliser ces conditions, nous proposons de coller les trois spires de l'anneau chauffant sur un excellent isolant thermique (matériaux tels que Kapton ou Mylar[15], etc...) pour limiter les transferts radiaux et l'échauffement du tube, et de fixer cette tête de sonde sur un corps en matière plastique, par l'intermédiaire d'une couche de bakélite (éviter les "fuites" dans le corps de sonde). Le tube central supportant le thermocouple est conservé.

L'alliage Nickel-Chrome utilisé pour l'élément chauffant a donné de bons résultats.

Le thermocouple est un dispositif de mesure de la température suffisamment précis et peu coûteux. Nous proposons cependant de remplacer les thermocouples de type T (Cuivre,Constantan : 40 $\mu$V/°C) par des types E (Ni-Cr,Cu-Cr : 60 $\mu$V/°C) qui sont plus faciles à mettre en oeuvre (réalisation des soudures chaudes et froides). Il permettent de plus de disposer d'une tension plus forte.

Pour faciliter la connexion des câbles au thermocouple et à la spire chauffante ou leur remplacement, le corps de sonde sera usiné sous la forme de deux demi-coques, emboîtables.

---

15. Marques déposées de Du Pont De Nemours.

*) *Amélioration de l'électronique de mesure.*

Les différents éléments utilisés ont tous leur place dans la chaîne de mesure, mais leur fonctionnement doit être rendu parfait. Il faut en particulier éliminer les parasites occasionnels et fortement diminuer la sensibilité des amplificateurs à la chaleur, par une isolation thermique ou une compensation électronique de température. Cette dernière possibilité n'est pas réaliste si l'on veut conserver le faible coût de l'ensemble.

Pour garantir une bonne souplesse d'utilisation, les différents composants de la chaîne pourront être intégrés dans un même boîtier, aisément transportable sur le terrain. Dans ces conditions, il faudra étudier le problème des parasites, encore possibles du fait de la proximité des circuits de puissance et d'amplification des signaux des thermocouples. On prévoira une ventilation pour limiter la température interne.

Le principe de l'émetteur de choc est conservé. On veillera simplement à apporter les modifications suivantes :

* augmenter la précision sur la valeur de $\Delta t$. En effet, la position du potentiomètre de réglage n'est pas strictement constante dans le temps, et cela modifie la durée de chauffe. Nous proposons de le remplacer par un commutateur à 3 positions (30, 40 et 50 s par exemple), qui permettra de choisir une valeur **précise** de $\Delta t$ selon le type de sol.

* de même, augmenter la précision sur la valeur de la puissance injectée en remplaçant les potentiomètres par un commutateur à 3 positions, permettant d'appliquer aux sondes **trois tensions stabilisées** (par exemple 4, 7 et 10 V).

On pourra ainsi choisir parmi 9 valeurs possibles de $UI.\Delta t$ selon le sol à caractériser. La précision requise pour cette valeur est de 1 %.

Pour les amplificateurs, il est nécessaire d'abaisser le gain à **100** pour rendre l'ensemble moins sensible aux courants parasites, et pour que le signal amplifié soit normalisé (0 - 10 mV)

Dans la mesure où toutes les fonctions sont rassemblées dans un même boîtier ventilé, la valeur du gain (100) devra être **garantie et connue** (1 %) sur une plage de température (20 - 50 °C).

### III.6.5. Applications possibles.

La méthode des chocs thermiques, développée par des hydrologues, peut être utilisée toutes les fois que l'on a besoin de connaître des valeurs ponctuelles d'humidité du sol. Ainsi, elle trouvera des applications en hydrologie, pour le suivi de la composante souterraine du bilan hydrique; en hydrodynamique pour l'étude fine de la répartition de l'eau dans la matrice poreuse (conditions réelles ou modèle réduit); en agronomie, pour le suivi de l'absorption racinaire, etc... En outre, elle fournira des "vérités terrain" ponctuelles pour les mesures d'humidité de surface par télédétection par exemple.

Comparée aux méthodes les plus utilisées dans ce domaine d'application (sonde à neutrons, sonde TDR), elle présente l'avantage d'utiliser un matériel de faible coût (environ dix fois moindre) et permet la mesure dans un volume de sol très réduit (quelques $cm^3$) sans en détruire la structure, avec des résultats qui devraient être aussi fiables après la mise en oeuvre de modifications proposées au cahier des charges.

Des applications "industrielles" pourraient également se développer, telles que le pilotage de réseaux d'irrigation (terrain de golf, agriculture, ...), ou la mesure de teneur en eau dans d'autres milieux tels que : silo à grains, solides pulvérulents, matériaux de construction, etc...

# CONCLUSION

Sur la base des travaux de B. Pouyaud, une étude théorique nous a permis de montrer que les sondes à élément chauffant circulaire étaient bien adaptées à la mesure de l'humidité du sol par la méthode des chocs thermiques.

Les essais réalisés sur une première chaîne de mesure nous ont permis de mettre en évidence des défauts importants dans les boîtiers (émetteur de choc et amplificateurs) et dans les sondes. Ceux-ci sont à l'origine de la mauvaise qualité de certaines mesures, qui n'ont pas toujours pu être corrigées. De ce fait, nous n'avons pas pu tirer des conclusions nettes quant à la précision de l'appareillage. Malgré cela, il apparait clairement que la méthode des chocs thermiques utilisant une sonde à anneau mérite d'être développée, étant donné les avantages qu'elle présente. Dans un cahier des charges, nous avons présenté la liste des modifications à apporter pour garantir une bonne fiabilité de l'instrumentation, et cela à un coût relativement faible.

Ces améliorations pourront transformer le prototype actuel en appareil réellement opérationnel. Une ultime phase de tests pourra convaincre d'éventuels utilisateurs de la fiabilité et de l'intérêt de la méthode. A ce titre, il est prévu de mettre à l'épreuve un appareil "modifié" lors d'une campagne de mesure en Afrique sahélienne (expérience HAPEX SAHEL). Cette seconde période de test (2 ans) permettra de définir la configuration optimale du système.

# REMERCIEMENTS

Que soient ici remerciés tous ceux qui ont contribué à mener à bien ce travail, et tout d'abord mes maîtres de stage, G. JACCON et B. POUYAUD, pour leurs conseils utiles et leur soutien pendant les sept mois du stage.

Merci également à M. GLAIZE, Professeur à l'Université de Montpellier et à Alain SAUSSOTTES, de la société ARTECH pour leur contributions à la mise au point des boîtiers et le suivi attentif des études.

Je ne voudrais pas oublier Roger CHARTIER qui, par son aide quotidienne et sa longue expérience de terrain m'a apporté beaucoup.

Mes remerciements s'adressent enfin à tous ceux avec qui j'ai pu collaborer, et en particulier à Philippe REVOL de la division irrigation du CEMAGREF, qui m'a permis de m'installer sur ses parcelles.

# BIBLIOGRAPHIE

* ASH G. et coll.
Les capteurs en instrumentation industrielle. Dunod, Paris, 1984.

* BASTIAN G. - 1982.
Détermination de la conductivité thermique de matériaux de construction par une méthode transitoire type "sonde cylindrique". Revue de physique appliquée, n°17, p. 217-225.

* BELLEFLEUR D. - 1986.
Le complexe eau-sol-plante. Cours ENITRTS.

* BENET J.C., POMADE P., HINZELIN P; - 1977.
Mesure de la conductivité thermique des sols par sonde cylindrique en régime transitoire. - Etude de l'influence du mode de mise en place de la sonde. Bull. R.I.L.E.M. vol. 10, N° 60, p. 385-392.

* BLOOMERT J.R & WARD J. - 1979.
A semi-automatique field apparatus for the measurement of thermal conductivities of sedimentary rocks. Journal of Physic. E. Sci. Instrum. vol. 12, n° 11, p. 1033 et ss.

* CARSLAW H.S. & JAEGER J.C.
Conduction of heat in the solids, Second edition, Oxford at the Clarendon Press, 1959.

* DE VRIES D.A., PECK A.J. - 1958.
On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils. Part 2: analysis of moisture effects. Australian J. of Physics vol. 11, n°3, p. 409-423.

* DROESCH J.P. - 1988.
Mesures, acquisition et traitement des donnée de l'état hydrique du sol, DEA ressources en eau CEMAGREF Anthony - Univ. Paris Sud, Labo. d'Hydrologie et de géochimie isotopique - ORSAY.

* GONNET E. - 1985.
Détermination de la diffusivité thermique de produits alimentaires par la méthode impulsionnelle. Application aux produits pastiers. Thèse Montpellier 2, USTL.

* HAMBURGER J., MERCIER J.L. - 1979.
Sonde à choc thermique, modèles théoriques, paramètres thermocinétiques d'un milieu poreux non saturé,leur relations avec la teneur en eau. Semin. "comportement thermique et hydraulique de la zone non saturée" E.P.F. Lausanne. 12 p.

* HORTON R., WIERENGA P.J., NIELSEN D.R. - 1982.
A rapid technique for obtaining uniform water content distribution in unsaturated soil columns. Soil Science, vol. 133, n°6, p. 397 et ss.

* LANDWERLIN F. - 1990.
Etat hydrique du sol et modélisation pluie/débit, DEA ressources en eau, CEMAGREF Anthony - Univ. Paris Sud, Labo. d'Hydrologie et de géochimie isotopique - ORSAY, ENITRTS Strasbourg.

* LAURENT J.P. - 1984.
Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires. Optimisation d'outils de mesure in-situ des paramètres thermiques. Application à l'étude des propriétés thermique du matériau terre. Thèse INPG Grenoble.

* MARTINET J.
Eléments de Thermocinétique, Technique et Documentation Lavoisier, Paris, 1990.

* MARTINET J.
Thermocinétique approfondie, Technique et Documentation Lavoisier, Paris, 1990.

* Mc ADAMS W.H.
Transmission de la chaleur, Dunod Paris 1964.

* MISSENARD André.
Conductivité thermique des solides, liquides gaz et de leurs mélanges, Editions Eyrolles Paris 1965.

* NACHTERGAL A & C.
Notes et formules du technicien, vol. 3 4° édition, De Boeck éditeur, Bruxelles 1961.

* POUYAUD B., - 1975.
Mesure de l'humidité des sols par chocs thermiques. Cahiers ORSTOM, série hydrologie, vol. 12, n°4, p.259-284.

* POUYAUD B., CHARTIER R., - 1971.
Méthode thermodynamique de mesure de l'humidité des sols. Cahiers ORSTOM, série hydrologie, vol. 8, n°1, p.65-98.

* RIDDICK, BURGER, SAKANO.
Tech. of Chemistry, vol. 2: Organic Solvants. Wiley Interscience.

* SOMERTON W.H., MOSSAHEBI M. - 1967.
Ring heat source probe for rapid determination of thermal conductivity of rocks. Review of Sci. Instrum. vol. 38, n° 10, p. 1368 et ss.

* TABBAGH A. - 1974.
Procédé de mesure in situ des paramètres thermiques des sols. Sciences du sol, Bulletin de l'A.F.E.S. n°4, vol. 12.

* VAN DER HELD E.F.M , VAN DRUNEN F.G. - 1949.
A method of measuring the thermal conductivity of liquids. Physica, 15, p. 865-881.

* VAN DER HELD E.F.M , HARDEBOL J. , KLASHOVEN J. 1953.
On the measurement of the thermal conductivity of liquids by a non-stationary method. Physica, 19, p. 208-216.

# ANNEXES

# ANNEXES

## SOMMAIRE

**Annexe 1.** Principe de mesures de températures par thermocouples.

**Annexe 2.** Exemple de traitement d'un fichier de données brutes.

**Annexe 3.** Fiches techniques sur l'appareillage.

A.3.1. Sondes n° 1 et 2.
A.3.2. Sondes n° 3 et 4.
A.3.3. Amplificateurs.
A.3.4. Emetteur de chocs.

**Annexe 4.** Etalonnages de laboratoire : graphes, calculs.

A.4.1. Détermination de k par étalonnage sur trois milieux connus.
A.4.2. Premier étalonnage sur sable. Sonde 2.
A.4.3. Second étalonnage sur sable : graphes, calculs. Sondes 1 et 2.
A.4.4. Second étalonnage sur sable : graphes, calculs. Sondes 2 et 3.
A.4.5. Etalonnage sur limon : graphes, calculs. Sondes 1 et 2.
A.4.6. Etalonnage sur limon : . graphes, calculs. Sondes 3 et 4.

**Annexe 5.** Etalonnages in-situ. Graphes, calculs.

A.5.1. Graphes, calculs. Sondes 1 et 2.
A.5.2. Graphes, calculs. Sondes 3 et 4.
A.5.3. Comparaison à la méthode TDR : graphes.

**Annexe 6.** Planches en couleur.

A.6.1. Planche 1.
A.6.2. Planche 2.

# ANNEXE 1

## PRINCIPE DE MESURE DE TEMPERATURES PAR THERMOCOUPLES.

# ANNEXE 1

## PRINCIPE DES MESURES DE TEMPERATURES PAR THERMOCOUPLES.

### 1. Définitions, principe.

Les thermocouples utilisent les propriétés des métaux énoncées ci-dessous. On peut montrer que dans un circuit composé de deux conducteurs dont la jonction est à la température $T_1$ et les extrémités A et B à $T_2$ et $T_3$, il se créé une force électromotrice[1] caractéristique des deux conducteurs et proportionnelle aux températures $T_1$, $T_2$ et $T_3$ (fig. A.1.1.). On peut donc mesurer une tension aux bornes A et B du dipôle ainsi constitué.

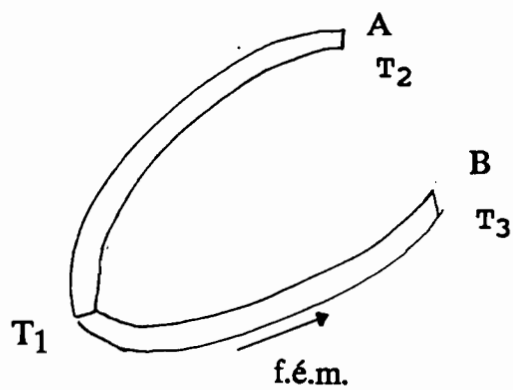



Fig. A.1.1.

Si l'on intercale entre deux brins d'un métal M un autre métal M', les jonctions étant à $T_1$ et $T_2$, la tension mesurée entre C et D ne dépend que de la nature des métaux et de la différence $T_2 - T_1$ (fig A.1.2.).

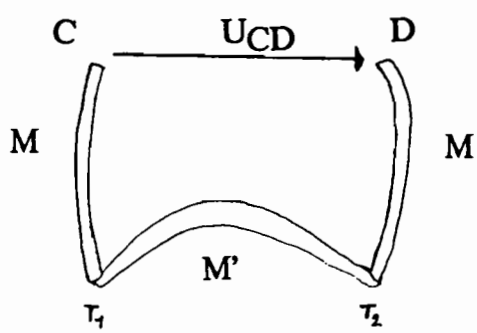



Fig. A.1.2.

[1]. Lorsqu'un circuit est le siège d'une force électromotrice, ou f.é.m, on peut mesurer une différence de potentiel (une tension) à ses bornes.

2. Mesure de températures.

Le dispositif de la figure A.1.2. permet la mesure de température. On relie la tension mesurée aux bornes du circuit à la température des jonctions par un coefficient caractéristique du couple de métaux utilisé. C'est celui que nous avons utilisé. Sur la figure A.1.3. ci-dessous, les jonctions (ou soudures) sont à des températures différentes. Le thermocouple mesure une différence de potentiel à ses bornes proportionnelle à $T_1$-$T_2$. Si l'on place l'une des soudures à température constante connue ( 0°C par exemple), on peut mesurer des températures absolues. Cette soudure à la température de référence est dénommée **soudure froide**, l'autre étant la **soudure chaude**.

Le dispositif de la figure A.1.1. permet également la mesure de températures, mais la tension aux bornes du circuit dépend en plus de la température des bornes A et B. Il faut donc compenser l'ensemble en température. De plus, pour ne pas introduire une f.é.m parasite due à d'autres couples métalliques, il est nécessaire de relier le dispositif à un appareil de mesure (voltmètre) par un câble fait des mêmes métaux que ceux du couple. Ce câble est appelé **câble compensation**.

Les thermocouples délivrent une tension en $\mu$V qui est proportionnelle à la température. Ainsi, les thermocouples Cuivre-Constantan que nous avons utilisés ont un gain de **40 $\mu$V par °C**.

Dans les sondes à chocs thermiques, la soudure froide trempe dans un milieu dont la température ne varie pas au cours de la mesure, et la soudure chaude détermine une élévation de température par rapport à la référence donnée par la soudure froide.

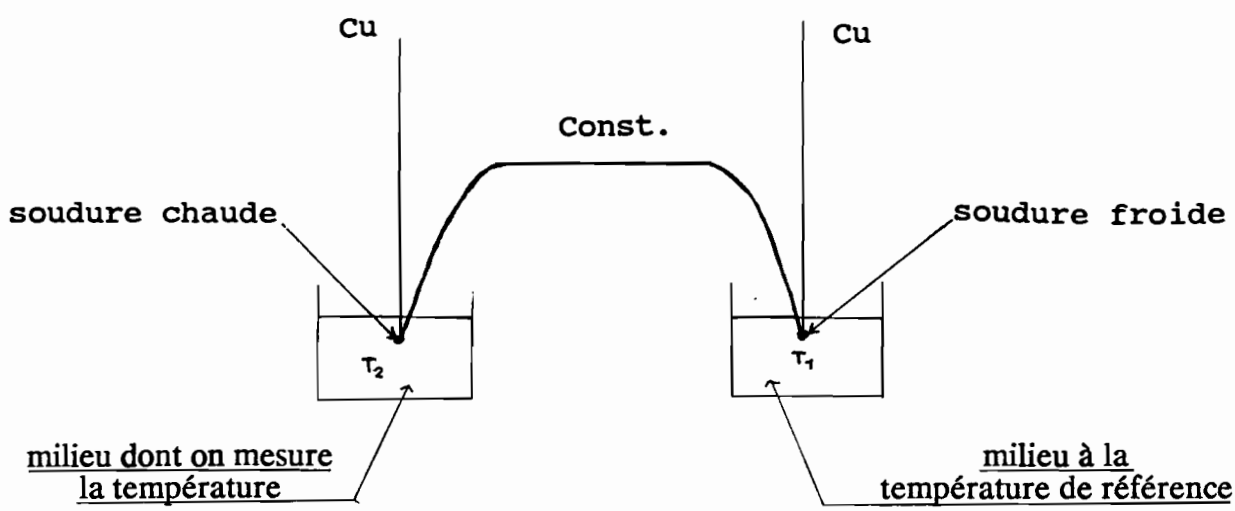



Fig. A.1.3.

# ANNEXE 2

**EXEMPLE DE TRAITEMENT D'UN FICHIER DE DONNEES BRUTES.**

# FICHIER BRUT

| | Températures mesurées par chaque sonde. | | | | | Temps | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Sonde 1 | Sonde 2 | sonde 3 | Sonde 4 | H,M | S |
| | 01+0102. | 02-0.611 | 03-0.229 | 04+0.051 | 05-0.498 | 06+1030. | 07+000 |
| | 01+0102. | 02-0.612 | 03-0.230 | 04+0.050 | 05-0.496 | 06+1030. | 07+010 |
| | 01+0102. | 02-0.613 | 03-0.234 | 04+0.061 | 05-0.498 | 06+1030. | 07+020 |
| | 01+0102. | 02-0.605 | 03-0.232 | 04+0.041 | 05-0.496 | 06+1030. | 07+030 |
| | 01+0102. | 02-0.596 | 03-0.228 | 04+0.068 | 05-0.497 | 06+1030. | 07+040 |
| (*) | 01+0102. | 02-1.575 | 03-1.223 | 04+1.067 | 05-1.486 | 06+1030. | 07+050 |
| | 01+0102. | 02-0.484 | 03-0.194 | 04+0.096 | 05-0.447 | 06+1031. | 07+000 |
| | 01+0102. | 02-0.336 | 03-0.133 | 04+0.115 | 05-0.369 | 06+1031. | 07+010 |
| | 01+0102. | 02-0.174 | 03-0.046 | 04+0.222 | 05-0.252 | 06+1031. | 07+020 |
| | 01+0102. | 02-0.019 | 03+0.056 | 04+0.317 | 05-0.125 | 06+1031. | 07+030 |
| (*) | 01+0102. | 02+1.114 | 03+1.169 | 04+1.466 | 05+1.002 | 06+1031. | 07+040 |
| | 01+0102. | 02+0.227 | 03+0.280 | 04+0.591 | 05+0.122 | 06+1031. | 07+050 |
| | 01+0102. | 02+0.331 | 03+0.379 | 04+0.721 | 05+0.232 | 06+1032. | 07+000 |
| | 01+0102. | 02+0.415 | 03+0.475 | 04+0.819 | 05+0.327 | 06+1032. | 07+010 |
| | 01+0102. | 02+0.484 | 03+0.558 | 04+0.902 | 05+0.412 | 06+1032. | 07+020 |
| | 01+0102. | 02+0.540 | 03+0.635 | 04+0.972 | 05+0.479 | 06+1032. | 07+030 |
| | 01+0102. | 02+0.584 | 03+0.697 | 04+1.044 | 05+0.536 | 06+1032. | 07+040 |
| | 01+0102. | 02+0.619 | 03+0.751 | 04+1.092 | 05+0.576 | 06+1032. | 07+050 |
| | 01+0102. | 02+0.643 | 03+0.796 | 04+1.139 | 05+0.614 | 06+1033. | 07+000 |
| | 01+0102. | 02+0.658 | 03+0.833 | 04+1.200 | 05+0.642 | 06+1033. | 07+010 |
| | 01+0102. | 02+0.663 | 03+0.852 | 04+1.114 | 05+0.667 | 06+1033. | 07+020 |
| | 01+0102. | 02+0.675 | 03+0.883 | 04+1.225 | 05+0.671 | 06+1033. | 07+030 |
| | 01+0102. | 02+0.675 | 03+0.900 | 04+1.239 | 05+0.677 | 06+1033. | 07+040 |
| | 01+0102. | 02+0.661 | 03+0.821 | 04+1.292 | 05+0.677 | 06+1033. | 07+050 |
| | 01+0102. | 02+0.661 | 03+0.921 | 04+1.292 | 05+0.677 | 06+1034. | 07+000 |
| | 01+0102. | 02+0.653 | 03+0.917 | 04+1.270 | 05+0.670 | 06+1034. | 07+010 |

(*) : Valeurs manifestement aberrantes, à supprimer.

Fig. A.2.1.

# ANNEXE 2

## EXEMPLE DE TRAITEMENT D'UN FICHIER DE DONNEES BRUTES.

Nous présentons ici un exemple fictif de traitement d'un fichier brut qui serait obtenu lors de mesures sur quatre voies, in-situ par exemple, avec un temps de scrutation de **10 secondes.**

*a) Description des fichiers bruts*

Lors de chaque scrutation, la centrale enregistre outre les températures mesurées[1] par chaque sonde, un code et une instruction de temps, correspondant à l'heure locale de la mesure (horloge interne de la centrale) (fig A.2.1. ci-contre).

*b) Traitement.*

Avant tout traitement, il faut effacer du fichier brut les valeurs qui n'ont manifestement pas de signification et qui peuvent influencer le résultat si elles sont supérieures à la valeur maximale vraisemblable de la série.concernée (fig A.2.1.). On s'affranchit de cette manière des valeurs correspondant à des **parasites**. L'intérêt de conserver toutes les valeurs mesurées est de déceler d'éventuelles mesures aberrantes.

Après traitement par "SPLIT", le fichier se présente sous la forme d'une série de lignes de valeurs correspondant aux températures mesurées et au temps. La dernière ligne donne la valeur maximale calculée dans chaque colonne. (fig A.2.2. page suivante)

*c) Calcul de $\Delta Tmax$*

On repère pour chaque sonde la température du milieu juste avant l'arrivée du front de chaleur. Cette valeur est soustraite du maximum de la série pour donner l'élévation maximale de température mesurée.

Remarque :

Le traitement permet aussi de déterminer le temps de propagation de $\Delta T_{max}$, qui permet de contrôler la bonne transmission de la chaleur dans le milieu.

---

[1]. Les tensions mesurées par la centrale sont immédiatement converties en température grâce à la droite d'étalonnage des thermocouples, et stockées sous cette forme.

# FICHIER TRAITE

Températures mesurées par chaque sonde.

| | Sonde 1 | Sonde 2 | sonde 3 | Sonde 4 | H,M | S |
|---|---|---|---|---|---|---|
| (1) | -0.611 | -0.229 | 0.051 | -0.498 | 1030 | 0 |
| | -0.612 | -0.230 | 0.050 | -0.496 | 1030 | 10 |
| | -0.613 | -0.234 | 0.061 | -0.498 | 1030 | 20 |
| | -0.605 | -0.232 | 0.041 | -0.496 | 1030 | 30 |
| | -0.596 | -0.228 | 0.068 | -0.497 | 1030 | 40 |
| | -0.484 | -0.194 | 0.096 | -0.447 | 1031 | 0 |
| | -0.336 | -0.133 | 0.115 | -0.369 | 1031 | 10 |
| | -0.174 | -0.046 | 0.222 | -0.252 | 1031 | 20 |
| | -0.019 | 0.056 | 0.317 | -0.125 | 1031 | 30 |
| | 0.227 | 0.280 | 0.591 | 0.122 | 1031 | 50 |
| | 0.331 | 0.379 | 0.721 | 0.232 | 1032 | 0 |
| | 0.415 | 0.475 | 0.819 | 0.327 | 1032 | 10 |
| | 0.484 | 0.558 | 0.902 | 0.412 | 1032 | 20 |
| | 0.540 | 0.635 | 0.972 | 0.479 | 1032 | 30 |
| | 0.584 | 0.697 | 1.044 | 0.536 | 1032 | 40 |
| | 0.619 | 0.751 | 1.092 | 0.576 | 1032 | 50 |
| | 0.643 | 0.796 | 1.139 | 0.614 | 1033 | 0 |
| | 0.658 | 0.833 | 1.200 | 0.642 | 1033 | 10 |
| | 0.663 | 0.852 | 1.114 | 0.667 | 1033 | 20 |
| | 0.675 | 0.883 | 1.225 | 0.671 | 1033 | 30 |
| | 0.676 | 0.900 | 1.239 | 0.680 | 1033 | 40 |
| | 0.661 | 0.921 | 1.292 | 0.677 | 1033 | 50 |
| | 0.659 | 0.919 | 1.287 | 0.675 | 1034 | 0 |
| | 0.653 | 0.917 | 1.270 | 0.670 | 1034 | 10 |
| | 0.676 | 0.921 | 1.292 | 0.680 | | |
| $\Delta T_{max}$ | 1.287 | 1.151 | 1.242 | 1.176 | | |

Zone de stabilité vis à vis de la température

Lignes où l'on a supprimé des valeurs.

Températures maximales mesurées par chaque sonde

(1) : Températures de référence retenues pour le calcul de $\Delta T_{max}$. Les valeurs différentes mesurées par chaque capteur traduisent la non-homogénéité de la répartition de la température dans le milieu.

Fig. A.2.2.

# ANNEXE 3

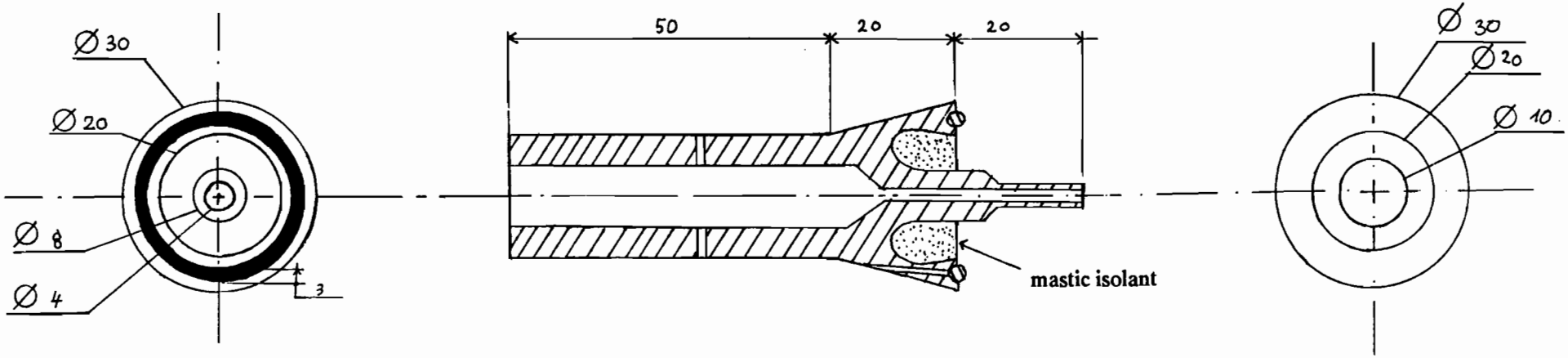
**FICHES TECHNIQUES SUR L'APPAREILLAGE.**

vue de droite

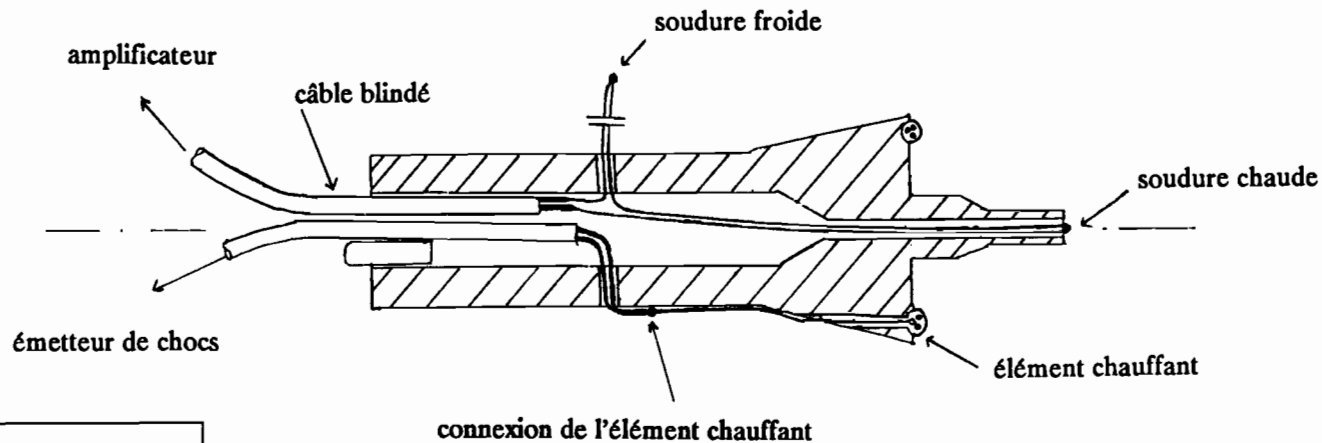
coupe longitudinale

vue de gauche

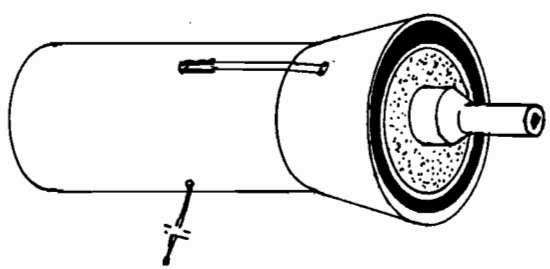
Sonde 1




Sonde 2




vue en perspective



DETAILS SONDES 1 ET 2

ECHELLE 1:1

Août 1991

# ANNEXE A.3.1.

## PRECISIONS SUR LA CONCEPTION DES CAPTEURS

### SONDES 1 ET 2

Les schémas des sondes sont présentés ci-contre. On rappelle que la sonde 1 diffère de la sonde 2 par la présence d'une gorge isolante.

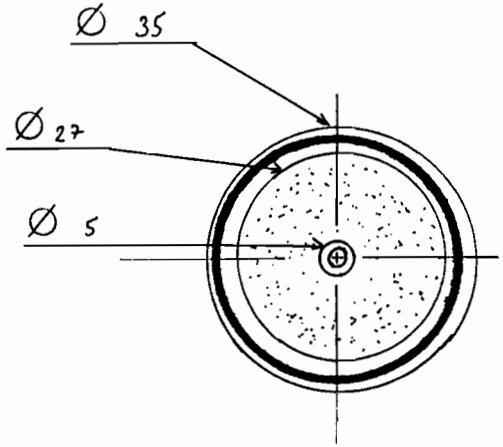
On note les précisions suivantes :

* tous les câbles passent à l'intérieur de la sonde,

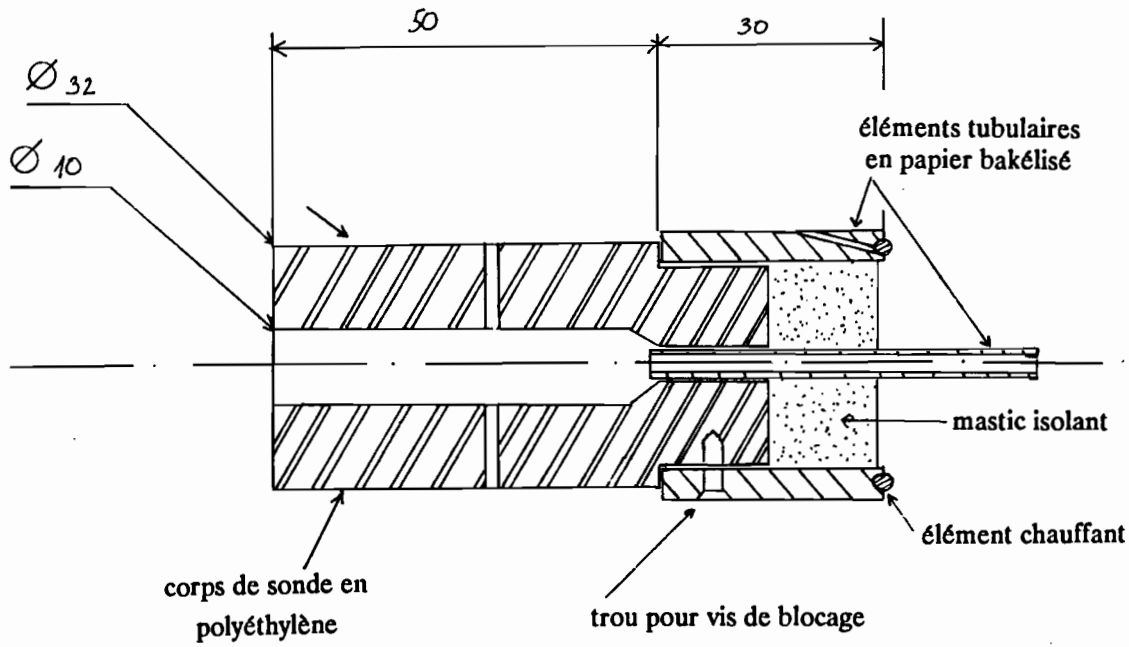
* La connexion de la résistance chauffante au câble d'alimentation se fait à l'extérieur de la sonde. Cette solution à été adoptée pour pouvoir changer l'élément chauffant (une connexion interne empêche de souder les fils). Le fil reliant l'élément chauffant au point de connexion est un brin de cuivre de petit diamètre. Si cette disposition peut paraître peu heureuse, elle a au moins l'avantage de permettre un refroidissement des fils d'alimentation de la résistance. On évite ainsi l'apport de chaleur dans la sonde, et limite les court-circuits thermiques.

On trouve dans le tableau ci-dessous les principales caractéristiques des sondes.

| SONDES 1 ET 2 | |
|---|---|
| **MATERIAUX** | |
| corps de sonde : | Céloron (tissus bakélisé) |
| résistance chauffante : | alliage nickel-chrome noyé dans une résine époxy |
| thermocouple : | type T (cuivre-constantan, 40 µV/°C) |
| **CARACTERISTIQUES** | |
| gorge isolante | (sonde 1) |
| résistance de l'élément chauffant : | 16,3 Ω (sonde 1)<br>17,5 Ω (sonde 2) |
| valeur de r : 2,45 cm +/- 5% | |




vue de droite




coupe longitudinale

| DETAILS SONDES 3 ET 4 |
|---|
| ECHELLE 1:1 |
| Août 1991 |

# ANNEXE A.3.2.

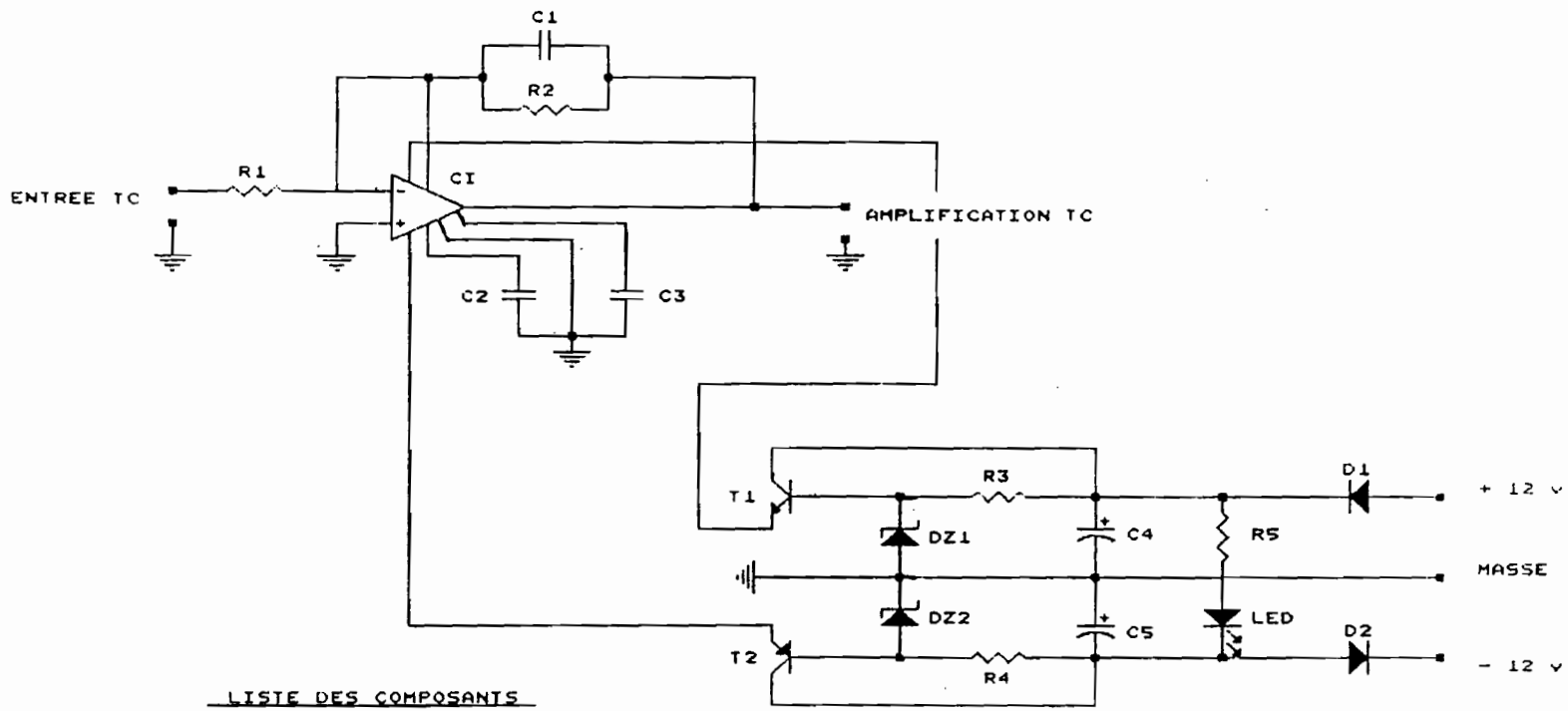
## PRECISIONS SUR LA CONCEPTION DES CAPTEURS

## SONDES 3 ET 4

Les deux sondes sont **identiques** et le passage des fils est le même que pour les deux premières. Des schémas explicatifs sont présentés ci-contre.

On trouve dans le tableau ci-dessous leurs principales caractéristiques.

| SONDES 3 ET 4 | |
|---|---|
| **MATERIAUX** | |
| tube central : | papier bakélisé |
| tête de sonde | papier bakélisé |
| corps de sonde : | polyéthylène |
| résistance chauffante : | alliage nickel-chrome noyé dans une résine époxy |
| thermocouple : | type T (cuivre-constantan, 40 µV/°C) |
| **CARACTERISTIQUES** | |
| gorge isolante | |
| résistance de l'élément chauffant : | 15,7Ω (sonde 3)<br>15,5Ω (sonde 4) |
| valeur de r : 2,55 cm +/- 5% | |




LISTE DES COMPOSANTS

| | |
|---|---|
| CI: ICL7652 | DZ1: ZENER 9,1v 1w |
| R1: 1 Kohm | DZ2: ZENER 9,1v 1w |
| R2: 1 Mohm | T1: 2N2222A NPN |
| R3: 220 ohm | T2: 2N2907A PNP |
| R4: 220 ohm | R5: 2,2 Kohm |
| C1: 150 nF 63v | LED: LED ROUGE |
| C2: 100 nF 63v | D1: 1N4007 |
| C3: 100 nF 63v | D2: 1N4007 |
| C4: 22 uF 16v | |
| C5: 22 uF 16v | |

| LECTURE DU THERMOCOUPLE | | |
|---|---|---|
| Size A | Document Number PGM: ORSTOM4 (modif.) | REV |
| Date: June 25, 1991 | Sheet of | |

# ANNEXE A.3.3.

## PRECISIONS SUR LA CONCEPTION DES AMPLIFICATEURS

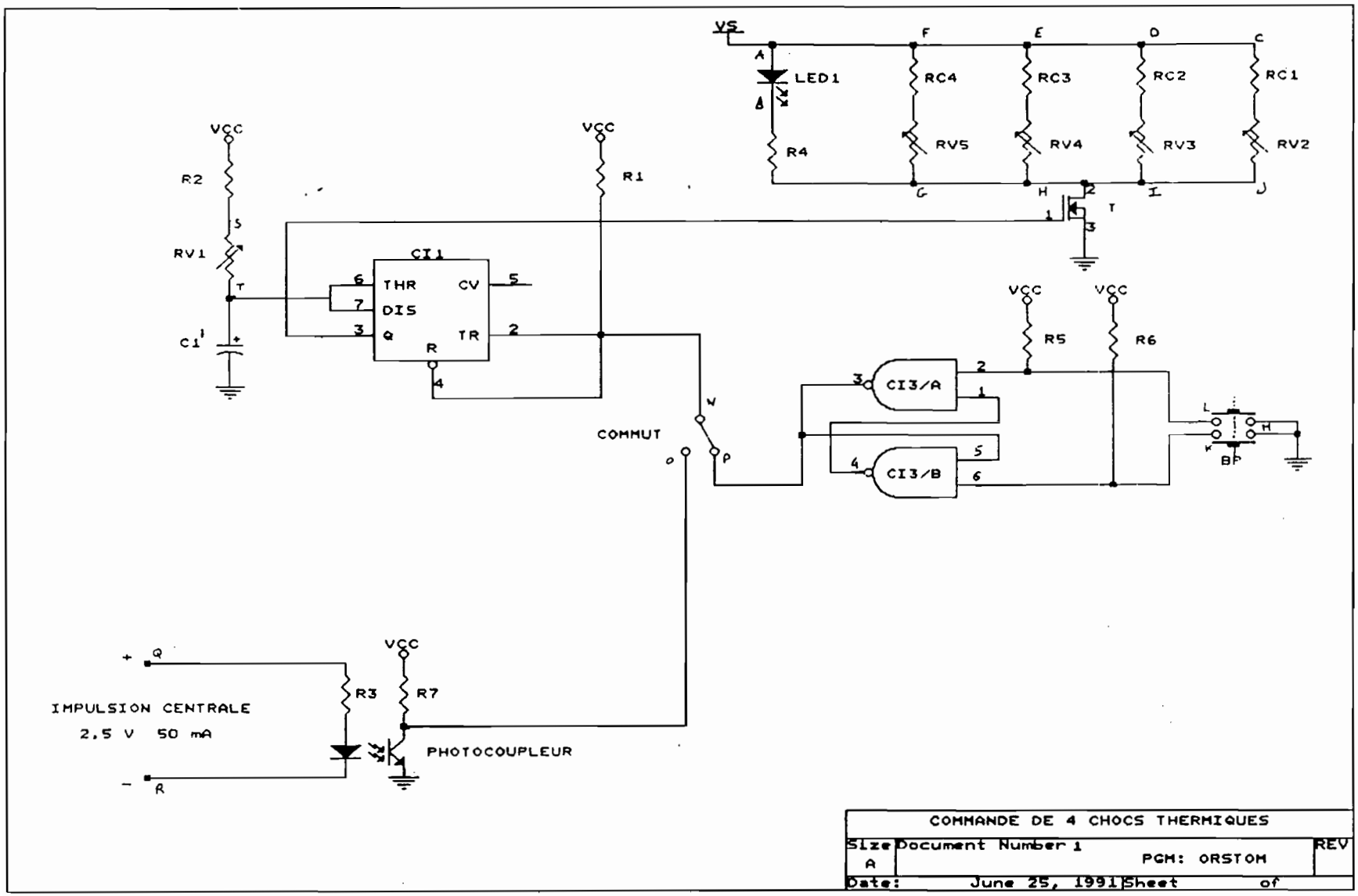
L'aspect général des boîtiers est précise en annexe 6.2., photo n°7.

On trouvera ci-contre le schéma électronique de l'appareil. (d'après documents ARTECH).

**PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT** (d'après document ARTECH)

L'amplificateur opérationnel CI est monté en amplificateur inverseur dont le gain est donné par - $R_2/R_1$, soit 1000 dans notre cas (c'est un maximum pour le ICL 7652).

La double tension d'alimentation de +9 V et -9 V nécessaire à l'amplificateur est assuré par une régulation de tension obtenue par $R_3$, $DZ_1$ et $T_1$ pour la tension positive, et par $R_4$, $DZ_2$ et $T_2$ pour la tension négative


VS
A
F
E
D
C
LED1
RC4
RC3
RC2
RC1
B
R4
RV5
RV4
RV3
RV2
G
H
I
J
T
VCC
R2
RV1
C1
CI1
THR
DIS
Q
R
CV
TR
R1
COMMUT
N
O
P
R5
R6
CI3/A
CI3/B
BP
K
L
M
+ Q
IMPULSION CENTRALE
2,5 V 50 mA
- R
R3
R7
PHOTOCOUPLEUR
COMMANDE DE 4 CHOCS THERMIQUES
Size A
Document Number 1
PGM: ORSTOM
REV
Date: June 25, 1991
Sheet of

# ANNEXE A.3.4.

## PRECISIONS SUR LA CONCEPTION DE L'EMETTEUR DE CHOCS

L'aspect général du boîtier est précisé en annexe 6.2., photo n°7.

On trouvera ci-contre le schéma électronique de l'appareil. (d'après documents ARTECH).

**PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT** (d'après document ARTECH)

Le CI1 (NE 555) est monté en circuit monostable; sa période instable, de durée $t = 1{,}1x(RV_1+RV_2)xC_1$, correspond à la durée du choc thermique. Il commande alors le transistor "MOS" (T) en tout ou rien ce qui a pour effet de mettre en tension les résistances.

En position "marche manuelle", le bouton poussoir BP génère une imulsion qui commande l'état instable du CI1. L es deux portes du CD 4011 constituent un circuit anti-rebonds.

En marche automatique, l'imulsion est provoquée par la centrale de mesure et elle commande le CI1 par l'intermédiare d'un photocoupleur.

# ANNEXE 4

## ETALONNAGES DE LABORATOIRE : GRAPHES, CALCULS.

**Note** : des notations différentes de celles du texte sont utilisées dans les annexes. Les correspondances sont indiquées ci-dessous :

Cm = $\Gamma$
Cv = C
d ou D = $\rho$
DT = $\Delta T_{max}$
Dt = $\Delta t$
mes. = mesuré
cor. = corrigé
DT' = $\Delta T$ corrigé en densité

**Remarque importante** : dans les annexes A.5.1 et A.5.2, les coefficients de corrélation sont calculés sur les nuages de points expérimentaux seuls, alors que la pente des droites l'est sur le même nuage étendu à l'ordonnée à l'origine théorique (cf texte III.4.1.2.d), page 64).

**Annexe 4.1.** Détermination de k par étalonnage sur trois milieux connus.
Résultats des régressions et tableau de calcul.

| Milieu | Glycérine |
|---|---|

| REGRESSION LINEAIRE | | |
|---|---|---|
| Résultats : | | |
| Second membre | | -0.0091 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0120 |
| R carré | | 0.98 |
| Nombre d'observations | | 8 |
| Degrés de liberté | | 6 |
| Coefficient(s) X | 0.0088 | |
| Err std du coef. | 0.0004 | |

| Milieu | Diéthylène-glycol |
|---|---|

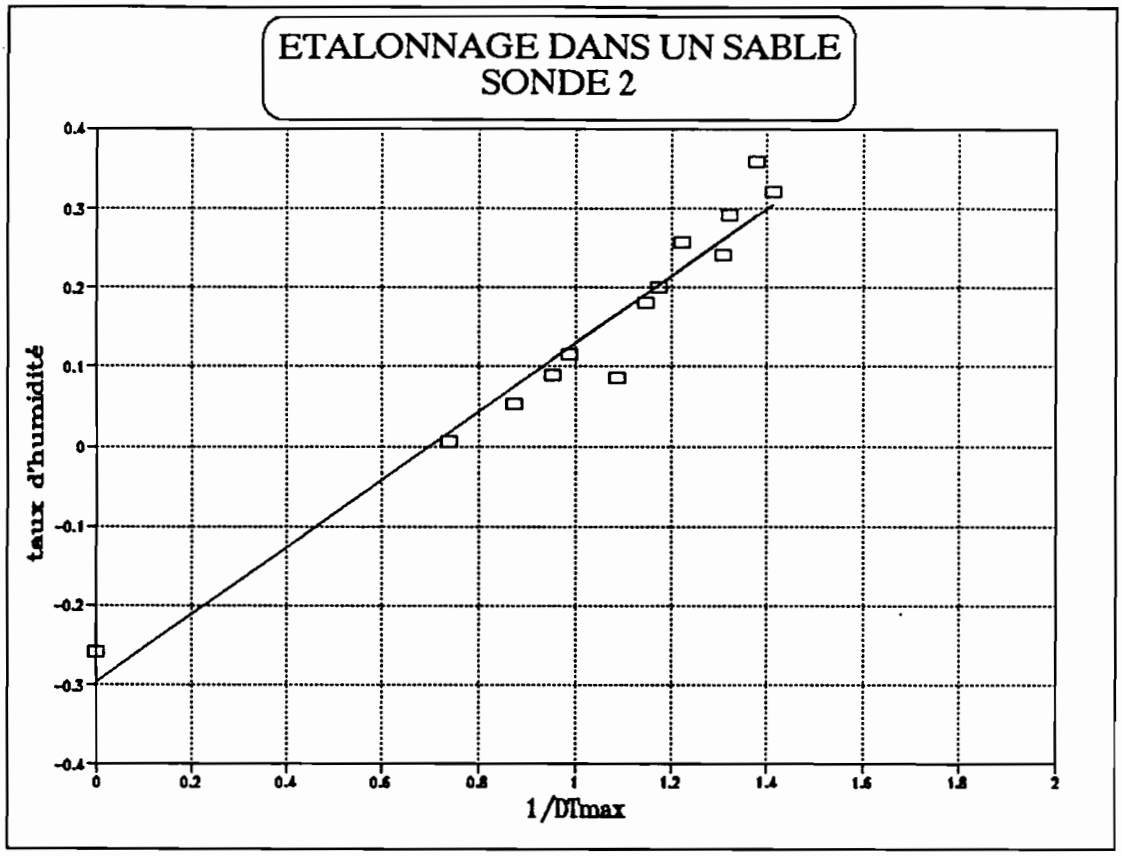
| REGRESSION LINEAIRE | | |
|---|---|---|
| Résultats : | | |
| Second membre | | 0.0101 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0064 |
| R carré | | 0.98 |
| Nombre d'observations | | 8 |
| Degrés de liberté | | 6 |
| Coefficient(s) X | 0.0034 | |
| Err std du coef. | 0.0002 | |

| Milieu | NaCl |
|---|---|

| REGRESSION LINEAIRE | | |
|---|---|---|
| Résultats : | | |
| Second membre | | 0.0151 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0377 |
| R carré | | 0.99 |
| Nombre d'observations | | 8 |
| Degrés de liberté | | 6 |
| Coefficient(s) X | 0.0263 | |
| Err std du coef. | 0.0007 | |

| CALCUL DU COEFFICIENT K | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Milieu | | Di. gly. | Glyc. | NaCl |
| Cm (*) | cal/g/K | 0.5509 | 0.5640 | 0.2057 |
| d | g/cm3 | 1.1177 | 1.2600 | 2.1650 |
| Cv | J/cm3/K | 2.5769 | 2.9740 | 1.8637 |
| P | W | 5.1 | 5.1 | 5.9 |
| r3 | cm3 | 14.7061 | 14.7061 | 14.7061 |
| DT/Dt | - | 0.0034 | 0.0088 | 0.0263 |
| K calculé | - | 0.0253 | 0.0755 | 0.1222 |
| K théor. | - | 0.0736 | 0.0736 | 0.0736 |

(*) valeurs tirées du "Handbook of Chemistry"




| DT mes. | D mes. | DT cor. | 1/DT' | theta |
|---|---|---|---|---|
| 0.687 | 1.46 | 0.726 | 1.377 | 0.358 |
| 0.801 | 1.41 | 0.818 | 1.223 | 0.258 |
| 0.735 | 1.42 | 0.756 | 1.323 | 0.290 |
| 0.971 | 1.31 | 0.921 | 1.086 | 0.085 |
| 1.123 | 1.29 | 1.049 | 0.953 | 0.089 |
| 0.828 | 1.42 | 0.851 | 1.174 | 0.200 |
| 1.065 | 1.31 | 1.010 | 0.990 | 0.115 |
| 0.892 | 1.35 | 0.872 | 1.147 | 0.180 |
| 0.782 | 1.35 | 0.765 | 1.308 | 0.240 |
| 1.250 | 1.5 | 1.358 | 0.736 | 0.005 |
| 0.693 | 1.41 | 0.708 | 1.413 | 0.321 |
| 1.181 | 1.34 | 1.146 | 0.873 | 0.053 |
| Ord. origine théor. | | | 0 | -0.262 |

densité de réf. 1,38

| REGRESSION LINEAIRE | |
|---|---|
| Second membre | -0.298 |
| Err std de l'est. de Y | 0.0384 |
| R carré | 0.92 |
| Nombre d'observations | 13 |
| Degrés de liberté | 11 |
| Coefficient(s) X | 0.427 |
| Err std du coef. | 0.0296 |

**Annexe 4.2.** Etalonnage complet sur sable. Sonde 2. Tableau de valeurs, calculs de régression et droite d'étalonnage.

Sonde 1, densité réf. 1,41

| DT mes | D mes | DT cor | 1/DT' | theta |
|---|---|---|---|---|
| 1.020 | 1.37 | 0.991 | 1.009 | 0.110 |
| 1.323 | 1.45 | 1.361 | 0.735 | 0.000 |
| 0.568 | 1.45 | 0.584 | 1.712 | 0.348 |
| Ord. origine théor. | | | 0 | 0.000 |

REGRESSION LINEAIRE

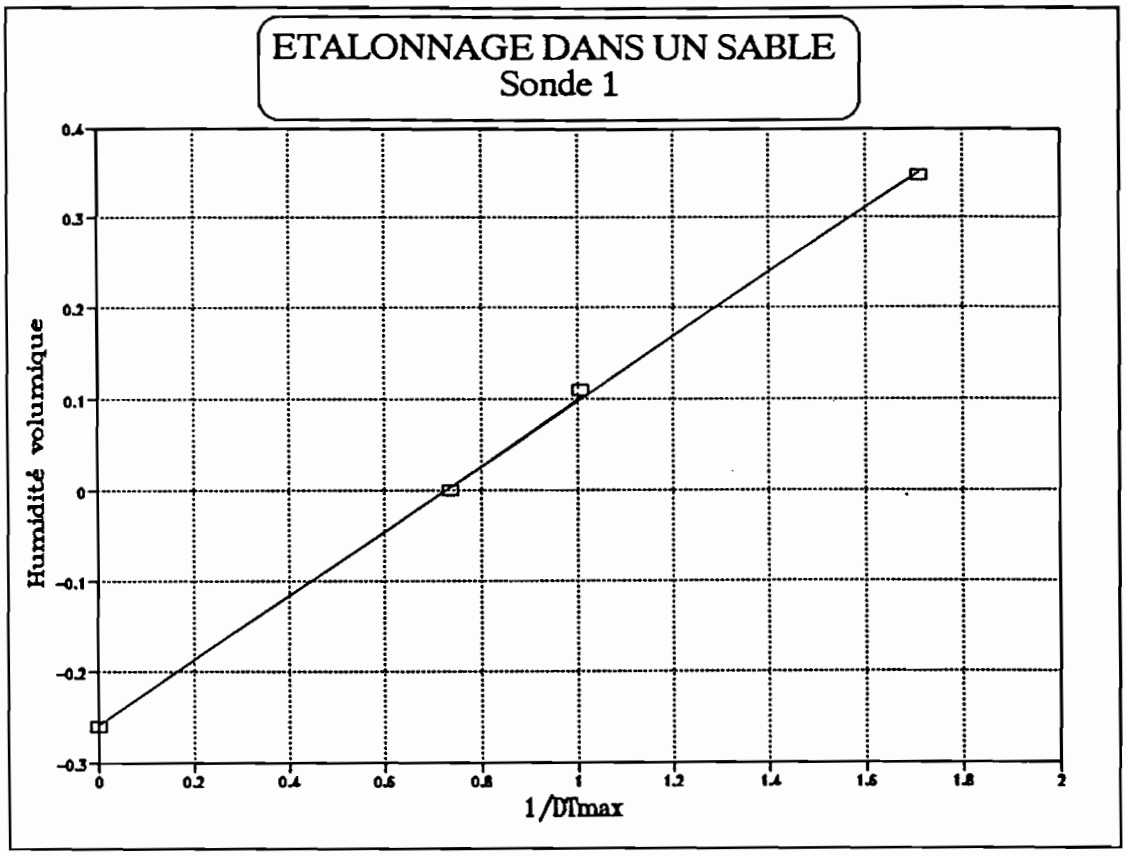
| | | |
|---|---|---|
| Second membre | | -0.2583 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0073 |
| R carré | | 0.99 |
| Nombre d'observations | | 4 |
| Degrés de liberté | | 2 |
| Coefficient(s) X | 0.356 | |
| Err std du coef. | 0.0060 | |

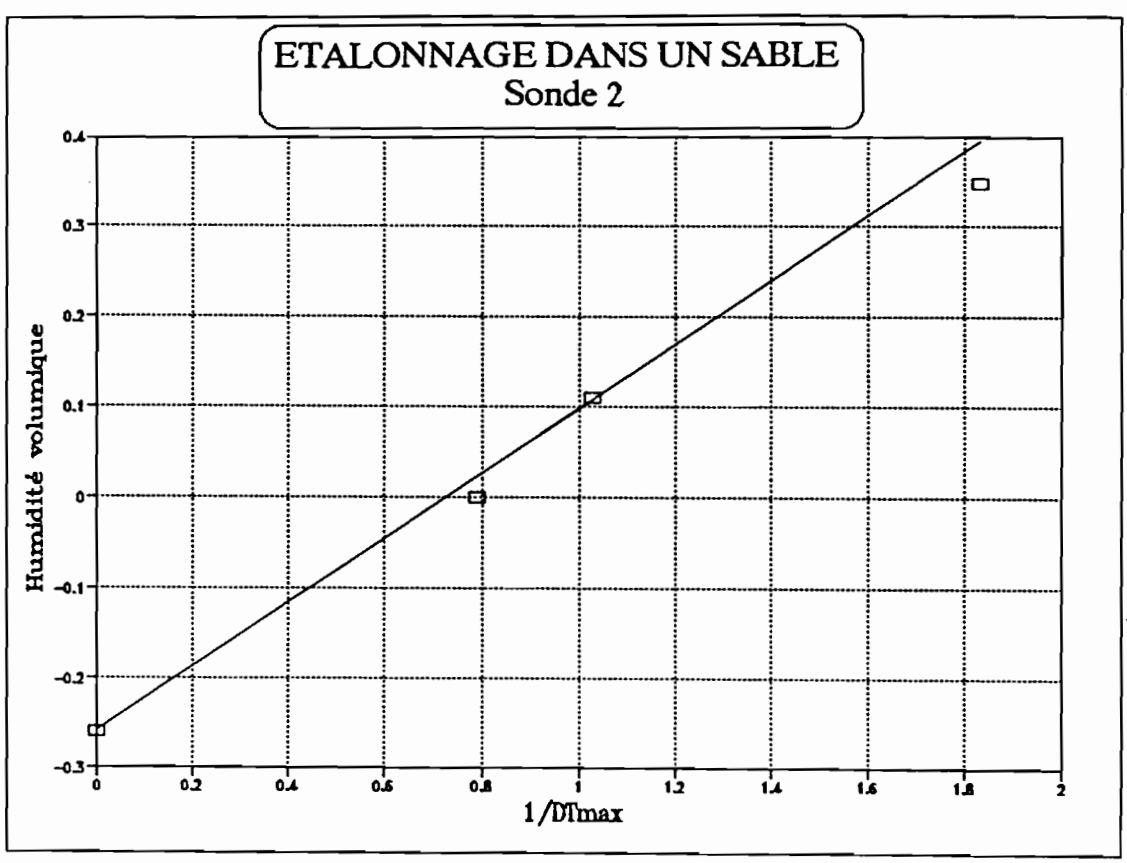
Sonde 2, densité réf. 1,41

| DT mes | D mes | DT cor | 1/DT' | theta |
|---|---|---|---|---|
| 1.000 | 1.37 | 0.972 | 1.029 | 0.110 |
| 1.231 | 1.45 | 1.266 | 0.790 | 0.000 |
| 0.531 | 1.45 | 0.546 | 1.831 | 0.348 |
| Ord. origine théor. | | | 0 | 0.000 |

REGRESSION LINEAIRE

| | | |
|---|---|---|
| Second membre | | -0.255 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0176 |
| R carré | | 0.99 |
| Nombre d'observations | | 4 |
| Degrés de liberté | | 2 |
| Coefficient(s) X | 0.334 | |
| Err std du coef. | 0.0135 | |




**Annexe 4.3.** Second étalonnage sur sable. Tableau de valeurs et calculs de régression (ci-contre). Droites d'étalonnage pour les sondes 1 et 2.

Sonde 3, densité réf. 1,41

| DT mes | D mes | DT cor | 1/DT' | theta |
|---|---|---|---|---|
| 0.817 | 1.37 | 0.794 | 1.260 | 0.110 |
| 1.430 | 1.45 | 1.471 | 0.680 | 0.000 |
| 0.588 | 1.45 | 0.605 | 1.654 | 0.348 |
| Ord. origine théor. | | | 0 | 0.000 |

REGRESSION LINEAIRE

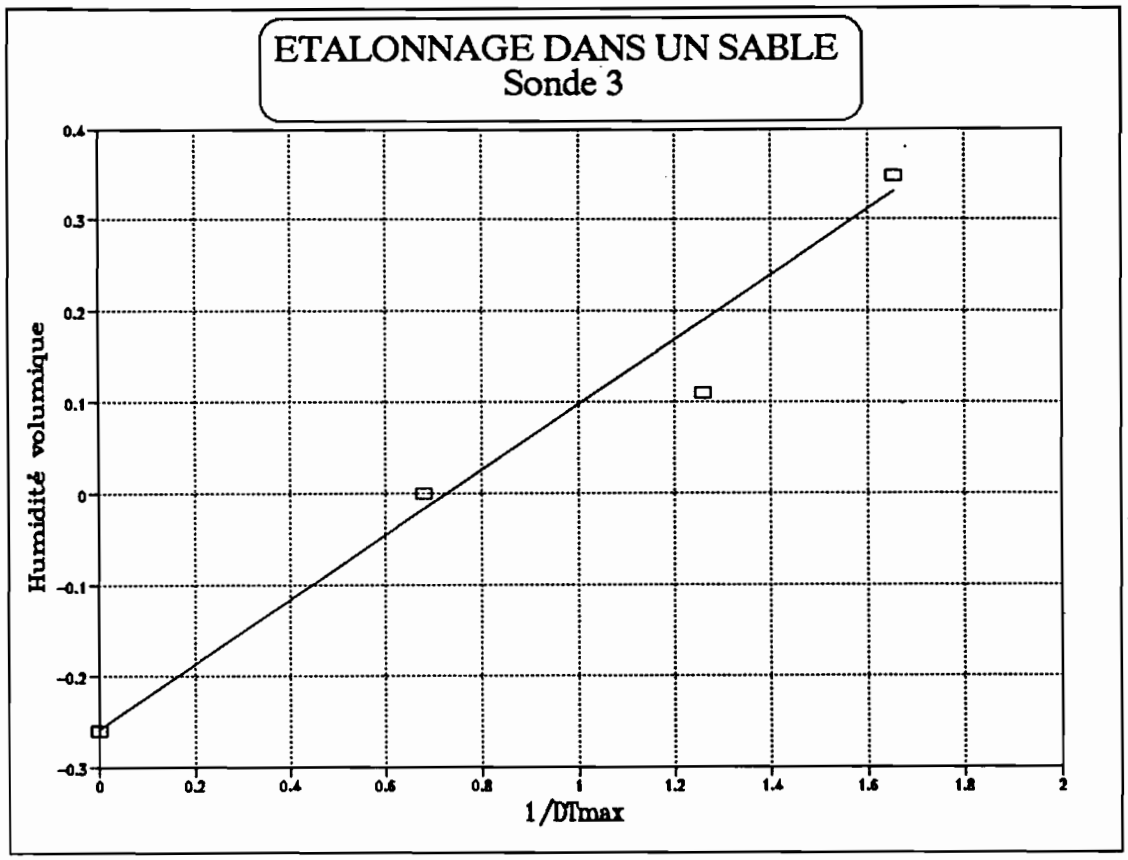
| | | |
|---|---|---|
| Second membre | | -0.2601 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0557 |
| R carré | | 0.96 |
| Nombre d'observations | | 4 |
| Degrés de liberté | | 2 |
| Coefficient(s) X | 0.345 | |
| Err std du coef. | 0.0447 | |

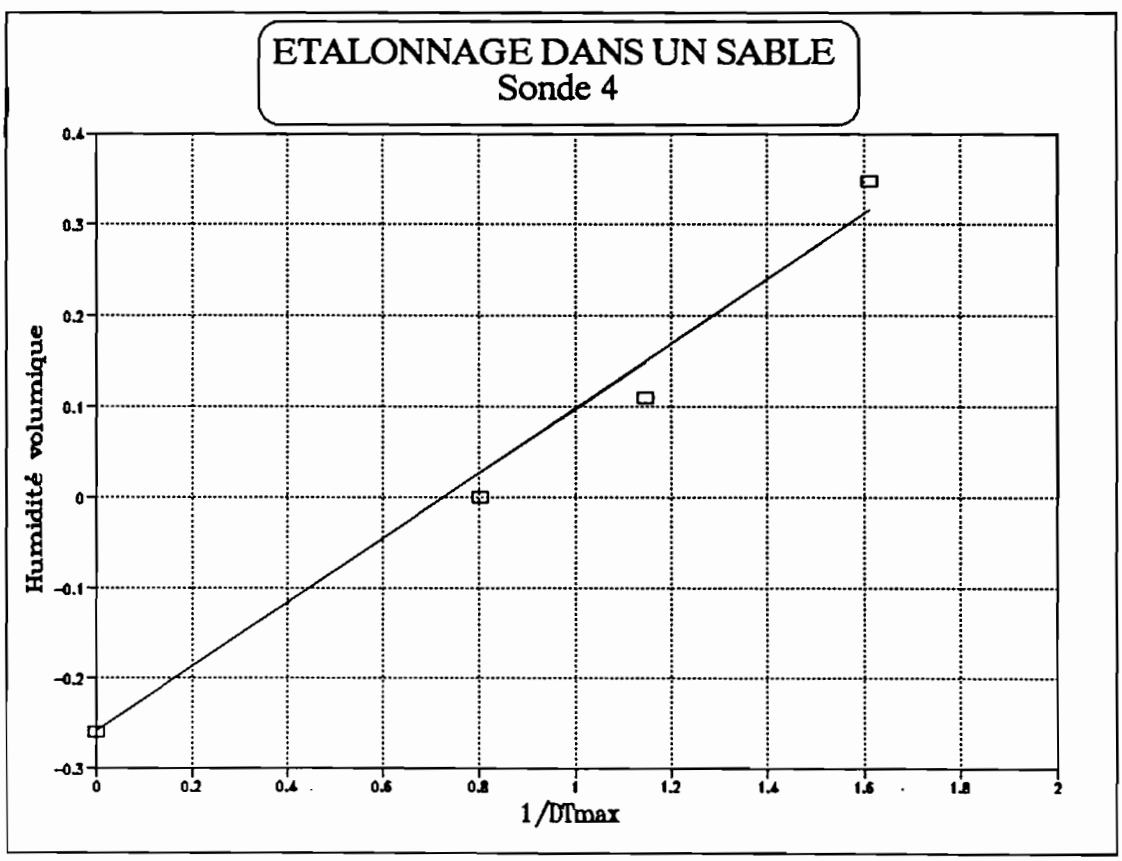
Sonde 4, densité réf. 1,41

| DT mes | D mes | DT cor | 1/DT' | theta |
|---|---|---|---|---|
| 0.898 | 1.37 | 0.873 | 1.146 | 0.110 |
| 1.213 | 1.45 | 1.247 | 0.802 | 0.000 |
| 0.603 | 1.45 | 0.620 | 1.613 | 0.348 |
| Ord. origine théor. | | | 0 | 0.000 |

REGRESSION LINEAIRE

| | | |
|---|---|---|
| Second membre | | -0.278 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0374 |
| R carré | | 0.98 |
| Nombre d'observations | | 4 |
| Degrés de liberté | | 2 |
| Coefficient(s) X | 0.368 | |
| Err std du coef. | 0.0318 | |




**Annexe 4.4.** Second étalonnage sur sable. Tableau de valeurs et calculs de régression (ci-contre). Droites d'étalonnage pour les sondes 3 et 4.

SONDE 1

| DT mes | D mes | DT' cor | 1/DT' | Uv mes % |
|---|---|---|---|---|
| 0.657 | 1.16 | 0.628 | 1.592 | 0.121 |
| 1.389 | 1.28 | 1.466 | 0.682 | 0.055 |
| 1.090 | 1.17 | 1.056 | 0.947 | 0.134 |
| 1.051 | 1.12 | 0.975 | 1.026 | 0.170 |
| 0.818 | 1.22 | 0.826 | 1.210 | 0.249 |
| 0.550 | 1.26 | 0.574 | 1.743 | 0.539 |
| 0.693 | 1.26 | 0.720 | 1.389 | 0.326 |
| Ord. origine théor. | | | 0 | -0.206 |

REGRESSION LINEAIRE

densité réf. 1.21

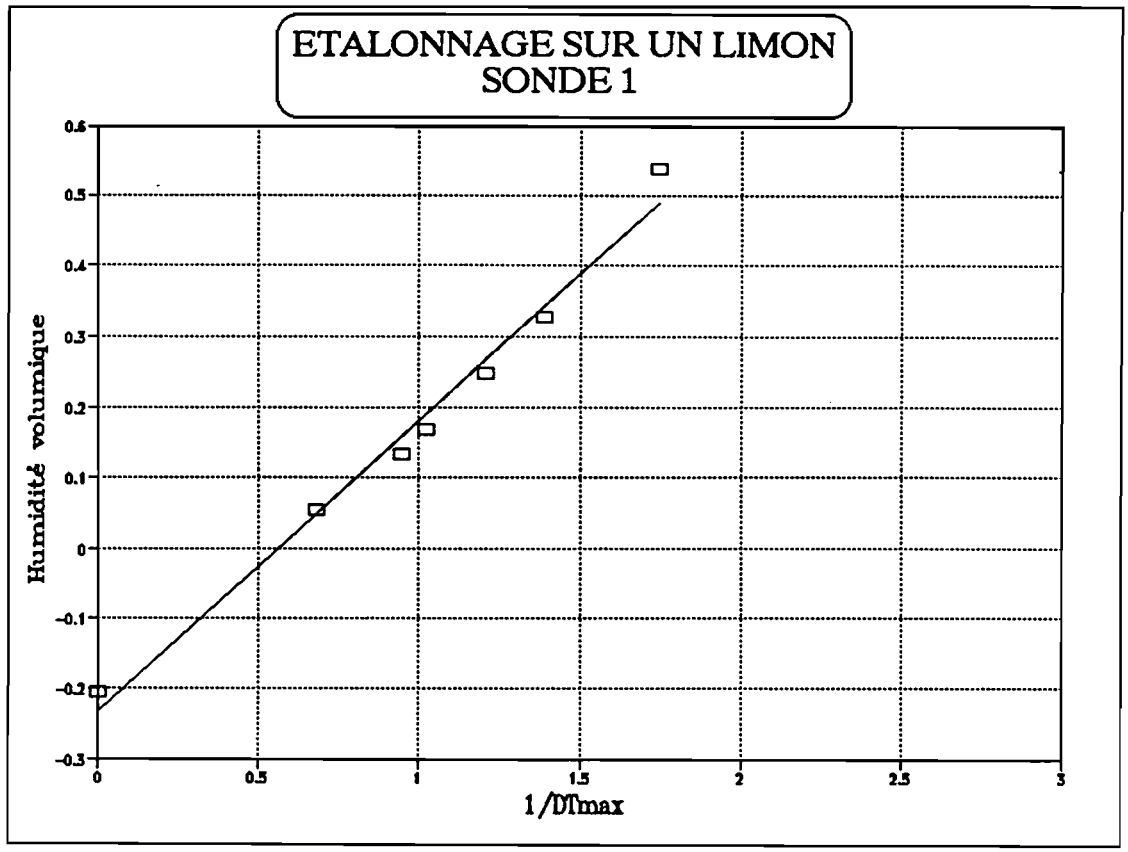
| Résultats : | | |
|---|---|---|
| Second membre | | -0.232 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0320 |
| R carré | | 0.98 |
| Nombre d'observations | | 7 |
| Degrés de liberté | | 5 |
| Coefficient(s) X | 0.413 | |
| Err std du coef. | 0.0235 | |

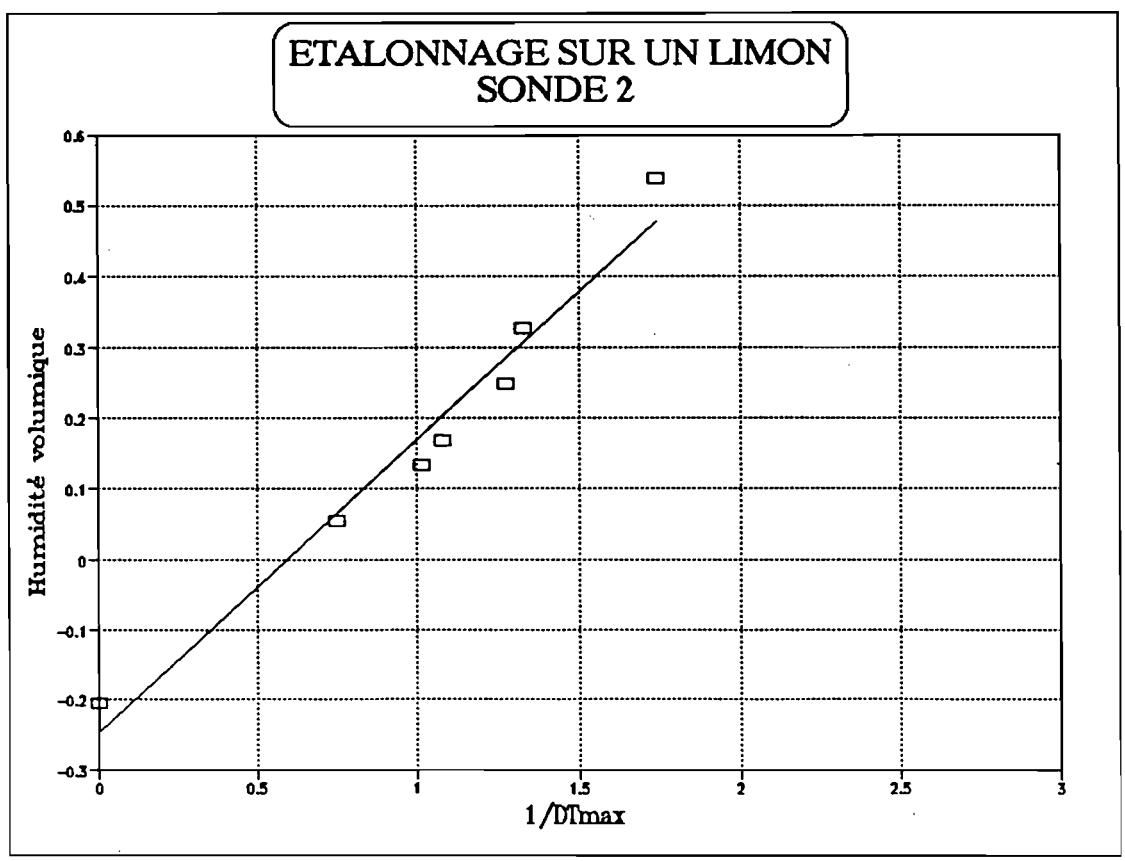
SONDE 2

| DT mes | D mes | DT' cor | 1/DT' | Uv mes % |
|---|---|---|---|---|
| 0.640 | 1.16 | 0.612 | 1.634 | 0.121 |
| 1.264 | 1.28 | 1.334 | 0.749 | 0.055 |
| 1.017 | 1.17 | 0.985 | 1.015 | 0.134 |
| 1.001 | 1.12 | 0.928 | 1.077 | 0.170 |
| 0.776 | 1.22 | 0.784 | 1.276 | 0.249 |
| 0.551 | 1.26 | 0.575 | 1.740 | 0.539 |
| 0.723 | 1.26 | 0.751 | 1.331 | 0.326 |
| Ord. origine théor. | | | 0.000 | -0.206 |

REGRESSION LINEAIRE

| Résultats : | | |
|---|---|---|
| Second membre | | -0.246 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0448 |
| R carré | | 0.97 |
| Nombre d'observations | | 7 |
| Degrés de liberté | | 5 |
| Coefficient(s) X | 0.416 | |
| Err std du coef. | 0.0334 | |




**Annexe 4.5.** Etalonnage sur limon. Tableau de valeurs et calculs de régression (ci-contre). Droites d'étalonnage pour les sondes 1 et 2.

SONDE 3

| DT mes | D mes | DT' cor | 1/DT' | Uv mes % |
|---|---|---|---|---|
| 0.466 | 1.16 | 0.446 | 2.244 | 0.121 |
| 0.985 | 1.28 | 1.040 | 0.962 | 0.055 |
| 0.855 | 1.17 | 0.828 | 1.207 | 0.134 |
| 0.767 | 1.12 | 0.711 | 1.406 | 0.170 |
| 0.618 | 1.22 | 0.624 | 1.602 | 0.249 |
| 0.378 | 1.26 | 0.394 | 2.536 | 0.539 |
| 0.529 | 1.26 | 0.550 | 1.819 | 0.326 |
| Ord. origine théor. | | | 0.000 | -0.206 |

REGRESSION LINEAIRE

densité réf. 1.21

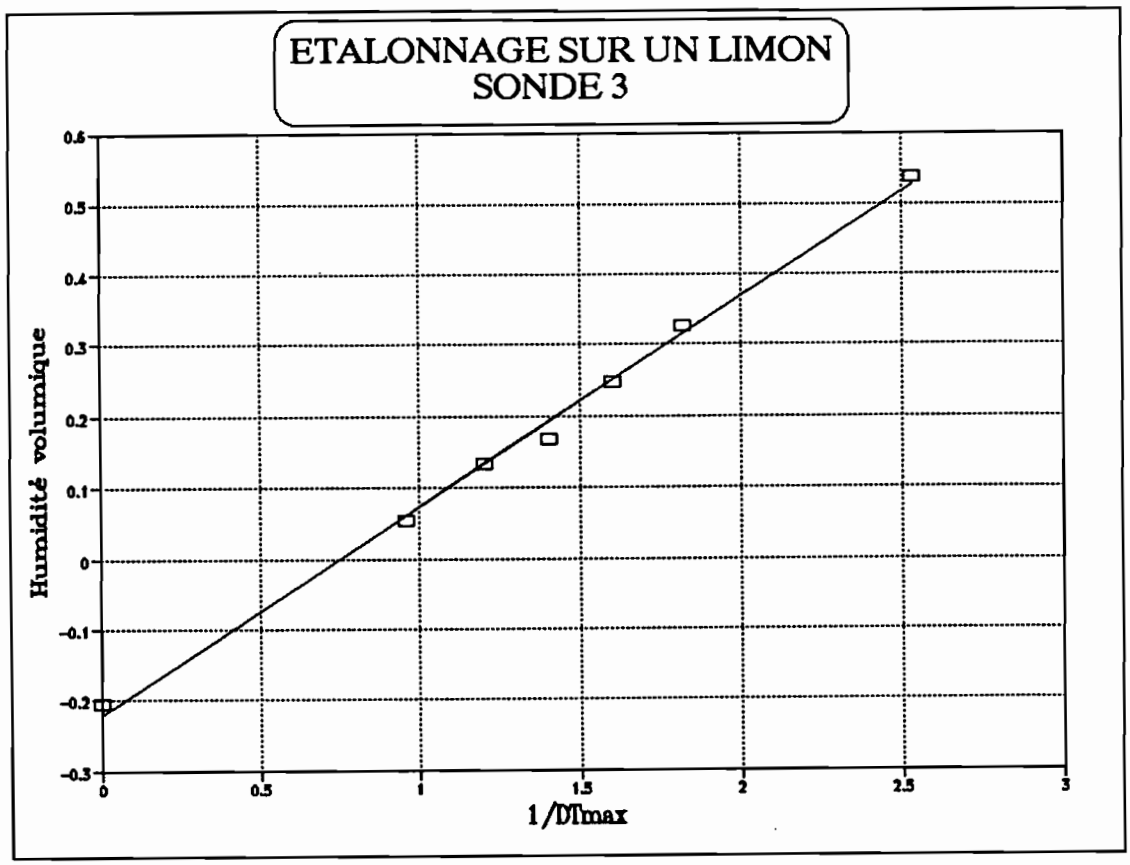
| Résultats : | | |
|---|---|---|
| Second membre | | -0.220 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0153 |
| R carré | | 0.99 |
| Nombre d'observations | | 7 |
| Degrés de liberté | | 5 |
| Coefficient(s) X | 0.295 | |
| Err std du coef. | 0.0080 | |

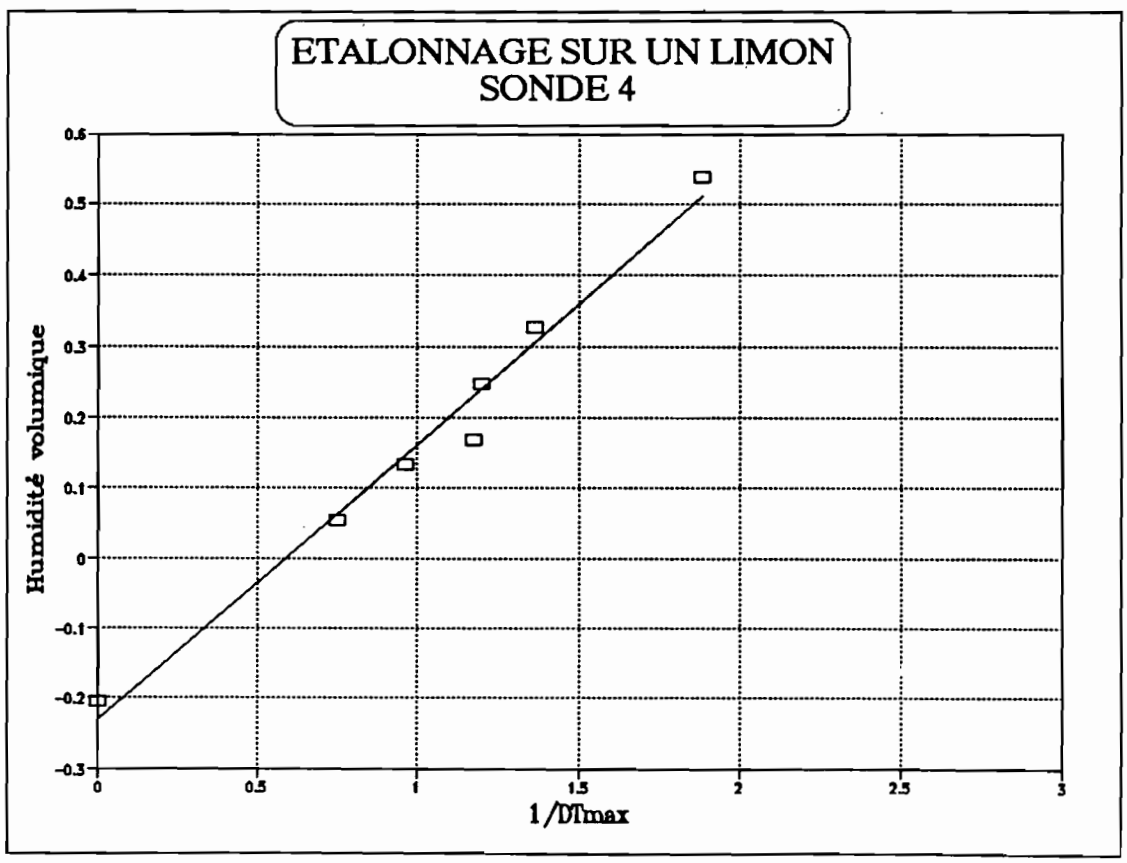
SONDE 4

| DT mes | D mes | DT' cor | 1/DT' | Uv mes % |
|---|---|---|---|---|
| 0.634 | 1.16 | 0.606 | 1.649 | 0.121 |
| 1.266 | 1.28 | 1.336 | 0.748 | 0.055 |
| 1.070 | 1.17 | 1.036 | 0.965 | 0.134 |
| 0.917 | 1.12 | 0.850 | 1.176 | 0.170 |
| 0.825 | 1.22 | 0.833 | 1.200 | 0.249 |
| 0.508 | 1.26 | 0.530 | 1.887 | 0.539 |
| 0.705 | 1.26 | 0.733 | 1.365 | 0.326 |
| Ord. origine théor. | | | 0.000 | -0.206 |

REGRESSION LINEAIRE

| Résultats : | | |
|---|---|---|
| Second membre | | -0.231 |
| Err std de l'est. de Y | | 0.0349 |
| R carré | | 0.97 |
| Nombre d'observations | | 7 |
| Degrés de liberté | | 5 |
| Coefficient(s) X | 0.393 | |
| Err std du coef. | 0.0244 | |




**Annexe 4.6.** Etalonnage sur limon. Tableau de valeurs et calculs de régression (ci-contre). Droites d'étalonnage pour les sondes 3 et 4.

# ANNEXE 5

## ETALONNAGES IN-SITU. GRAPHES, CALCULS.

Note : des notations différentes de celles du texte sont utilisées dans les annexes. Les correspondances sont indiquées ci-dessous :

Cm = Γ
Cv = C
d ou D = $\rho$
DT = $\Delta T_{max}$
Dt = $\Delta t$
mes. = mesuré
cor. = corrigé
DT' = $\Delta T$ corrigé en densité

**Remarque importante** : dans les annexes A.4.2 à A.4.6, les coefficients de corrélation sont calculés sur les nuages de points expérimentaux seuls, alors que la pente des droites l'est sur le même nuage étendu à l'ordonnée à l'origine théorique (cf texte III.4.1.2.d), page 64).

SONDE 1

| DT max | 1/DT | D mes | 1/DT | theta |
|---|---|---|---|---|
| 1.088 | 0.919 | 1.39 | 0.972 | 0.030 |
| 0.646 | 1.548 | 1.38 | 1.648 | 0.256 |
| 0.756 | 1.323 | 1.48 | 1.313 | 0.172 |
| 0.686 | 1.458 | 1.48 | 1.447 | 0.331 |
| 0.954 | 1.048 | 1.40 | 1.100 | 0.059 |
| 0.657 | 1.522 | 1.45 | 1.542 | 0.316 |
| 1.075 | 0.930 | 1.35 | 1.012 | 0.112 |
| 0.684 | 1.462 | 1.43 | 1.502 | 0.272 |
| 0.669 | 1.495 | 1.56 | 1.408 | 0.325 |
| 0.794 | 1.259 | 1.53 | 1.209 | 0.144 |
| 0.695 | 1.439 | 1.57 | 1.346 | 0.284 |
| 0.644 | 1.553 | 1.52 | 1.501 | 0.243 |
| 0.587 | 1.704 | 1.56 | 1.604 | 0.277 |
| Ord. origine théorique | | | 0.000 | -0.250 |

SONDE 2

| DT max | 1/DT | D mes | 1/DT | theta |
|---|---|---|---|---|
| 1.093 | 0.915 | 1.39 | 0.968 | 0.030 |
| 0.645 | 1.550 | 1.38 | 1.651 | 0.256 |
| 0.723 | 1.383 | 1.48 | 1.374 | 0.331 |
| 0.988 | 1.012 | 1.40 | 1.063 | 0.059 |
| 0.623 | 1.605 | 1.45 | 1.627 | 0.316 |
| 0.844 | 1.185 | 1.35 | 1.290 | 0.112 |
| 0.637 | 1.570 | 1.43 | 1.614 | 0.272 |
| 0.619 | 1.616 | 1.52 | 1.562 | 0.201 |
| 0.642 | 1.558 | 1.56 | 1.468 | 0.325 |
| 0.724 | 1.381 | 1.53 | 1.327 | 0.144 |
| 0.867 | 1.153 | 1.35 | 1.256 | 0.176 |
| 0.776 | 1.289 | 1.43 | 1.325 | 0.283 |
| 0.613 | 1.631 | 1.52 | 1.578 | 0.243 |
| Ord. origine théorique | | | 0.000 | -0.250 |

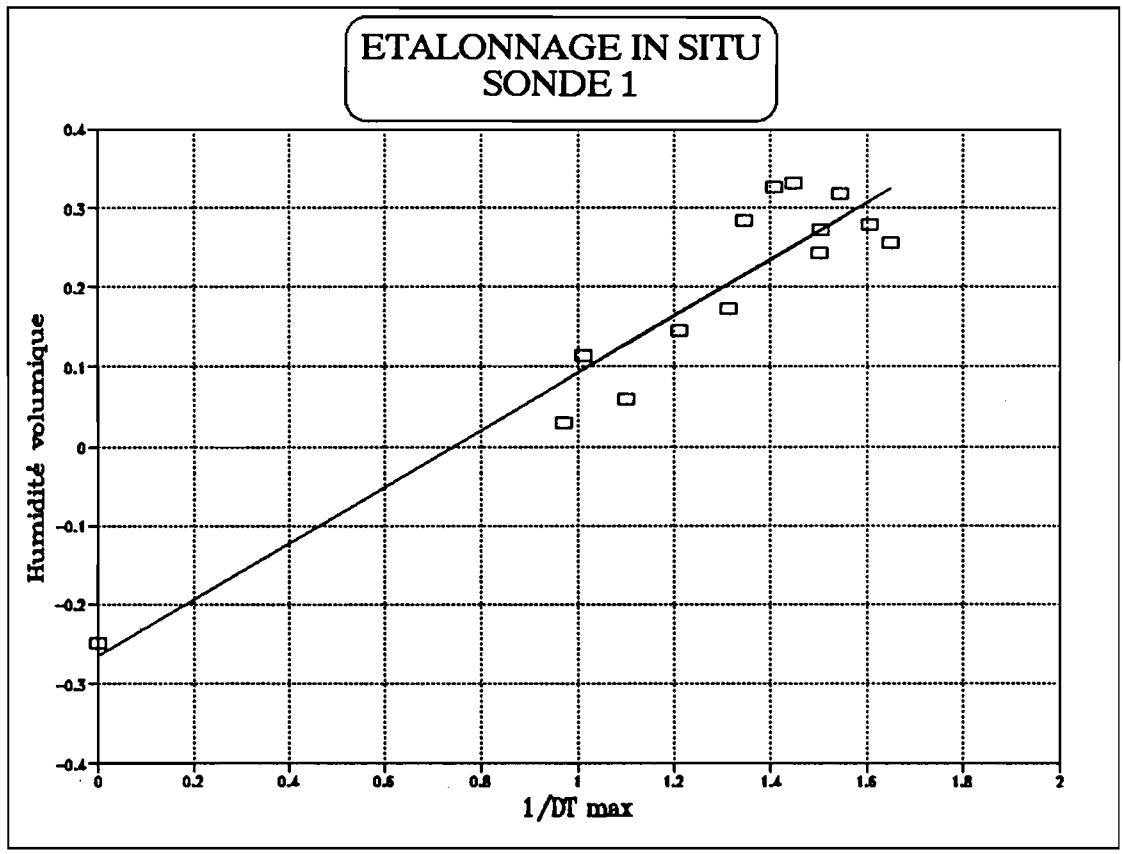
densité de référence : 1,21

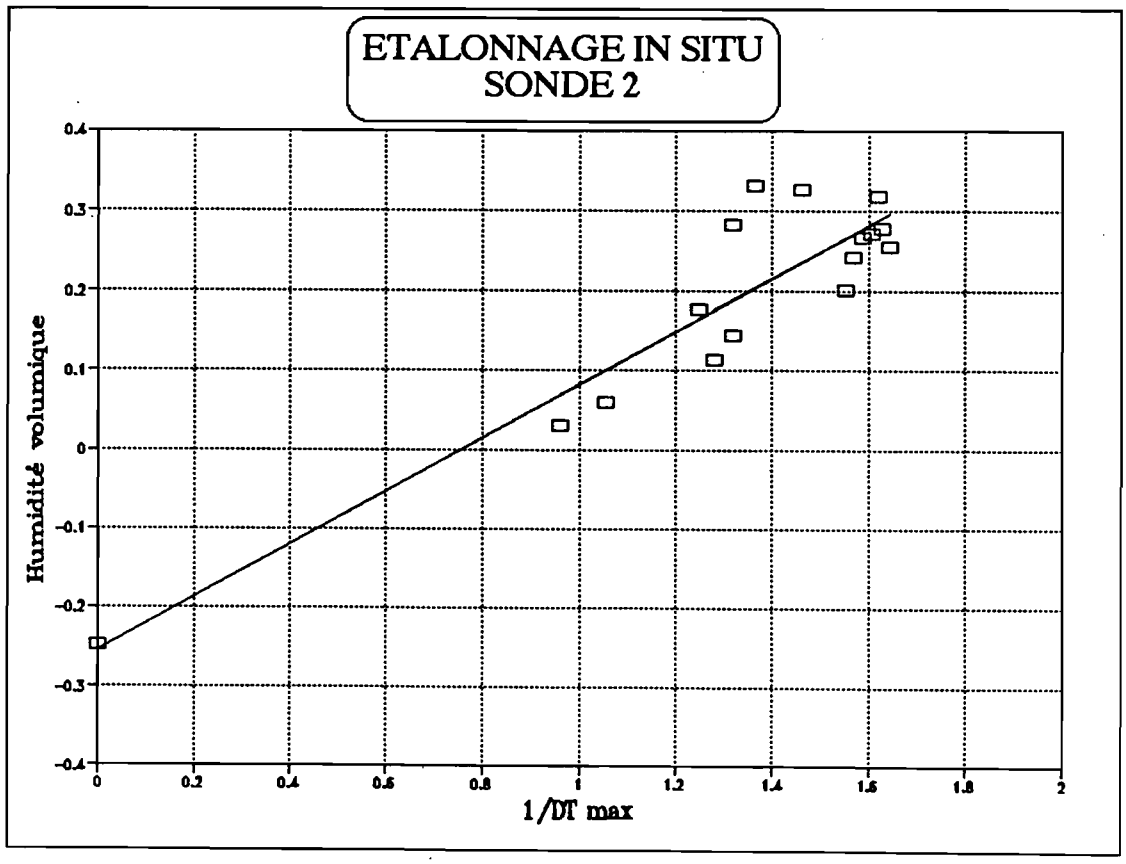
REGRESSION LINEAIRE

| Résultats : | |
|---|---|
| Second membre | -0.266 |
| Err std de l'est. de Y | 0.054 |
| R carré | 0.73 |
| Nombre d'observations | 14 |
| Degrés de liberté | 12 |
| Coefficient(s) X | 0.358 |
| Err std du coef. | 0.036 |

REGRESSION LINEAIRE

| Résultats : | |
|---|---|
| Second membre | -0.254 |
| Err std de l'est. de Y | 0.060 |
| R carré | 0.61 |
| Nombre d'observations | 16 |
| Degrés de liberté | 14 |
| Coefficient(s) X | 0.335 |
| Err std du coef. | 0.038 |




**Annexe 5.1.** Droites d'étalonnage in-situ et valeurs utilisées pour le calcul des régressions (ci-contre). Sondes 1 et 2.

SONDE 3

| DT max | 1/DT | D sec | 1/DT' | theta |
|---|---|---|---|---|
| 0.953 | 1.049 | 1.39 | 1.110 | 0.030 |
| 0.779 | 1.284 | 1.38 | 1.367 | 0.256 |
| 0.624 | 1.603 | 1.48 | 1.592 | 0.172 |
| 0.713 | 1.403 | 1.48 | 1.393 | 0.331 |
| 0.819 | 1.221 | 1.40 | 1.282 | 0.059 |
| 0.507 | 1.972 | 1.45 | 2.000 | 0.316 |
| 0.817 | 1.224 | 1.35 | 1.333 | 0.112 |
| 0.570 | 1.754 | 1.43 | 1.803 | 0.272 |
| 0.640 | 1.563 | 1.56 | 1.472 | 0.325 |
| 0.549 | 1.821 | 1.57 | 1.705 | 0.284 |
| 0.887 | 1.127 | 1.35 | 1.228 | 0.176 |
| 0.636 | 1.572 | 1.43 | 1.616 | 0.283 |
| 0.615 | 1.626 | 1.52 | 1.573 | 0.243 |
| 0.513 | 1.949 | 1.56 | 1.837 | 0.277 |
| 0.572 | 1.748 | 1.53 | 1.680 | 0.193 |
| Ord. origine théorique | | | 0.000 | -0.250 |

SONDE 4

| DT max | 1/DT | D sec | 1/DT' | theta |
|---|---|---|---|---|
| 0.918 | 1.089 | 1.39 | 1.148 | 0.030 |
| 0.779 | 1.284 | 1.38 | 1.363 | 0.256 |
| 0.637 | 1.570 | 1.48 | 1.554 | 0.331 |
| 1.067 | 0.937 | 1.40 | 0.981 | 0.059 |
| 0.533 | 1.876 | 1.45 | 1.896 | 0.316 |
| 1.060 | 0.943 | 1.35 | 1.024 | 0.112 |
| 0.814 | 1.229 | 1.43 | 1.259 | 0.272 |
| 0.689 | 1.451 | 1.56 | 1.363 | 0.325 |
| 0.642 | 1.558 | 1.43 | 1.596 | 0.283 |
| 0.748 | 1.337 | 1.52 | 1.289 | 0.243 |
| 0.574 | 1.742 | 1.56 | 1.636 | 0.277 |
| 0.862 | 1.160 | 1.53 | 1.111 | 0.193 |
| 0.613 | 1.631 | 1.57 | 1.523 | 0.268 |
| Ord. origine théorique | | | 0.000 | -0.250 |

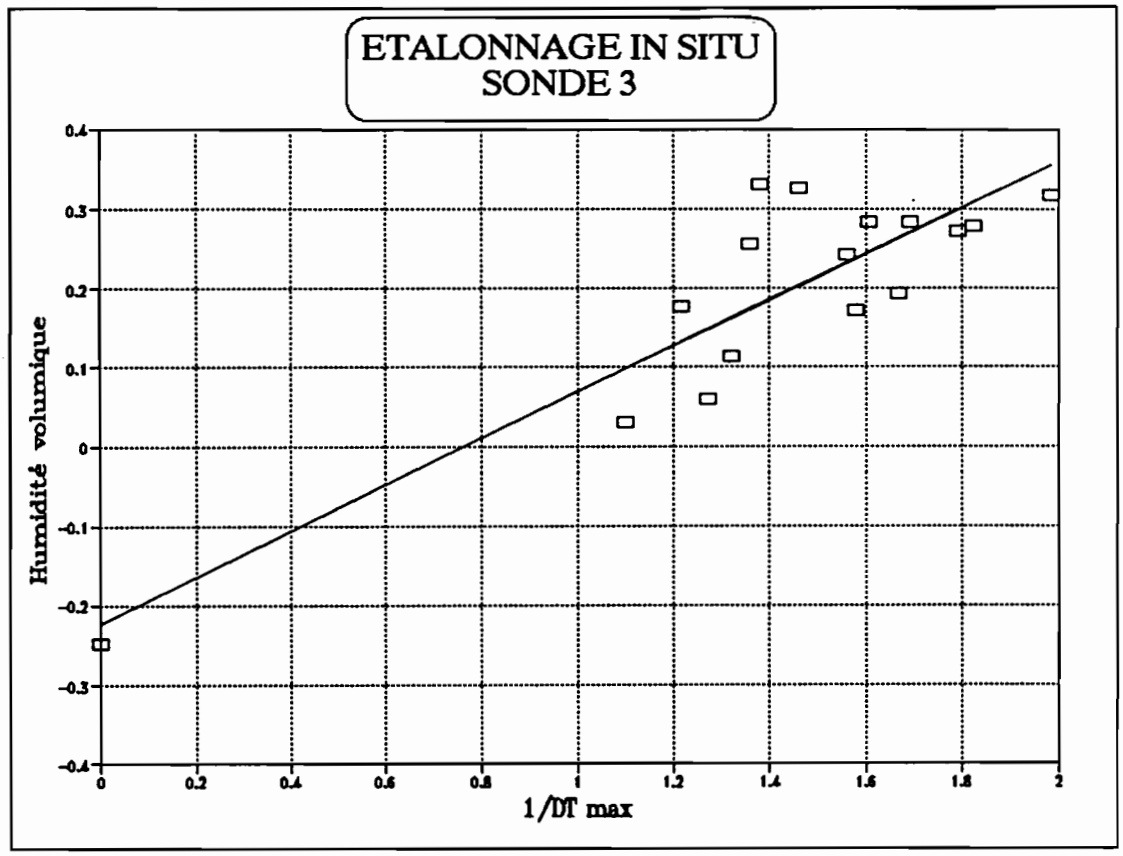
densité de référence : 1,21

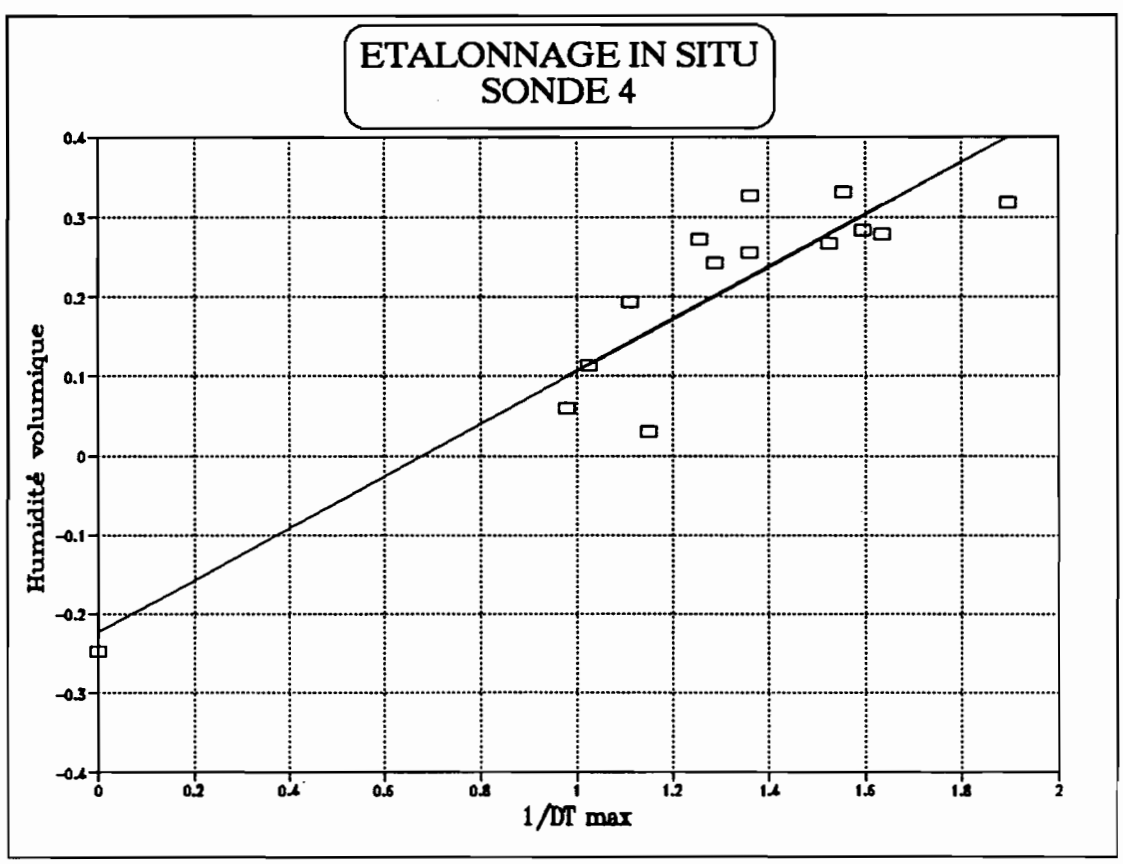
REGRESSION LINEAIRE

| Résultats : | |
|---|---|
| Second membre | -0.223 |
| Err std de l'est. de Y | 0.074 |
| R carré | 0.42 |
| Nombre d'observations | 16 |
| Degrés de liberté | 14 |
| Coefficient(s) X | 0.292 |
| Err std du coef. | 0.042 |

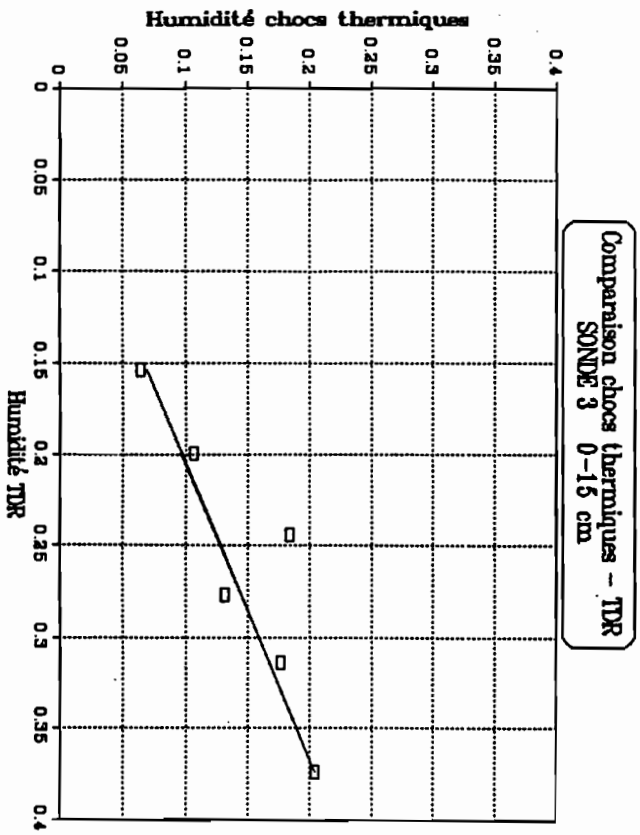
REGRESSION LINEAIRE

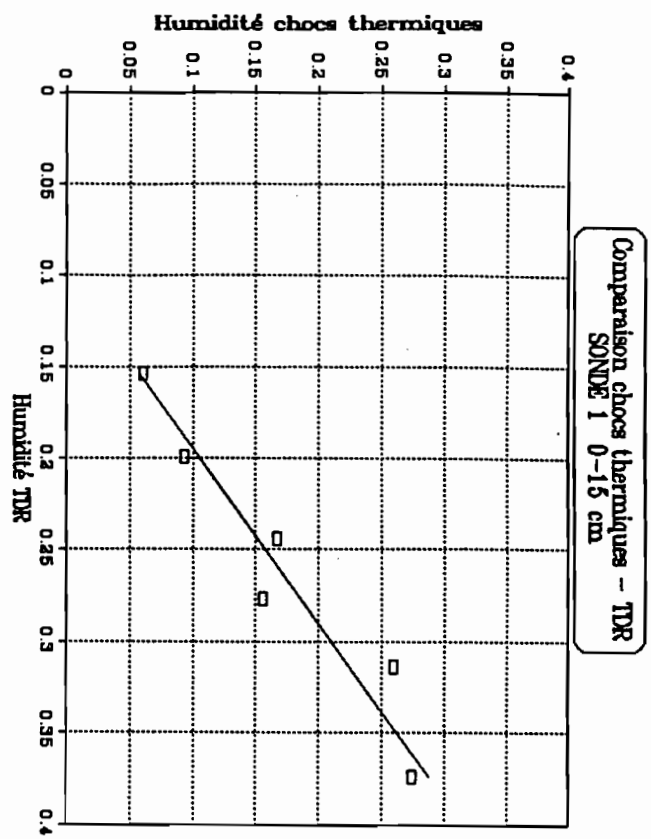
| Résultats : | |
|---|---|
| Second membre | -0.223 |
| Err std de l'est. de Y | 0.065 |
| R carré | 0.60 |
| Nombre d'observations | 14 |
| Degrés de liberté | 12 |
| Coefficient(s) X | 0.329 |
| Err std du coef. | 0.040 |

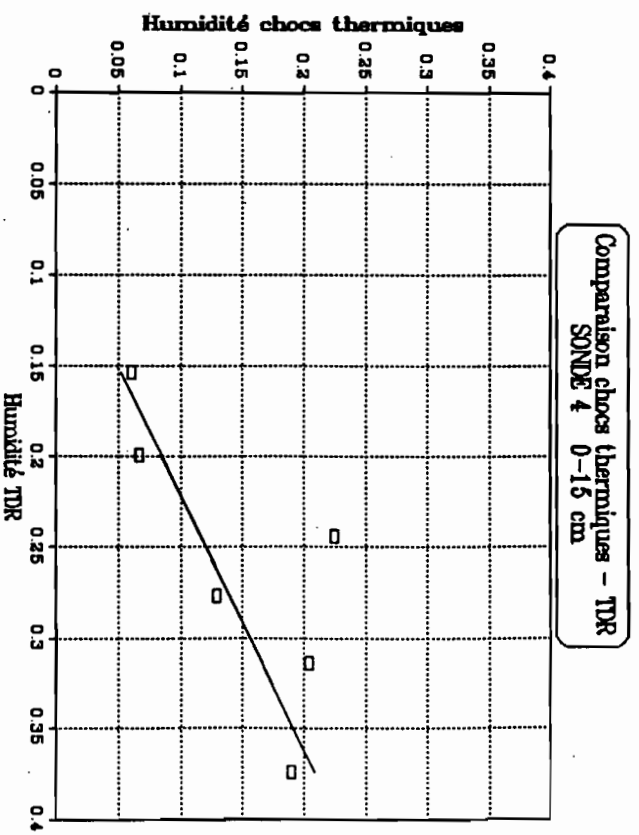


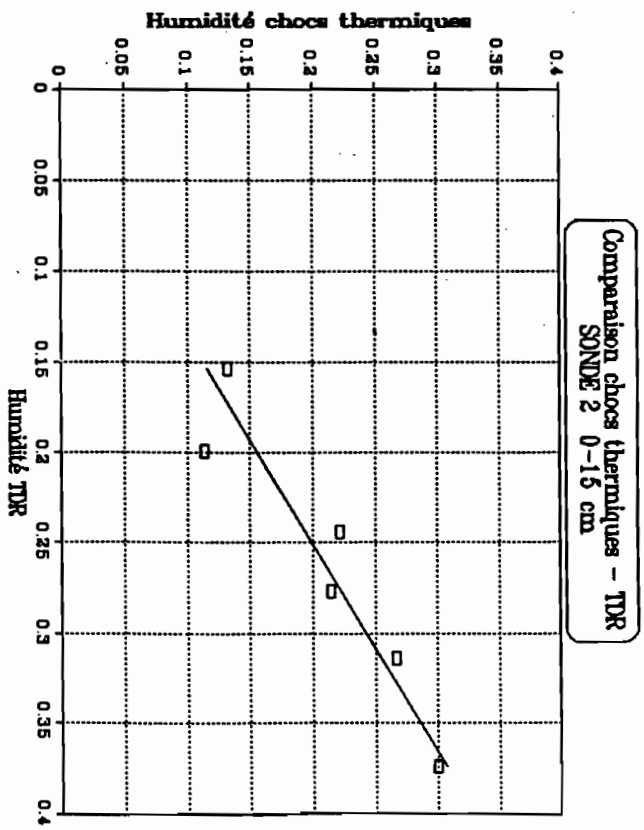




**Annexe 5.2.** Droites d'étalonnage in-situ et valeurs utilisées pour le calcul des régressions (ci-contre). Sondes 3 et 4.




**Annexe 5.3.** Comparaison à la méthode TDR. Graphes des régressions $\theta$ chocs thermiques = f($\theta$ TDR) Sondes 1 à 4.

# ANNEXE 6

## PLANCHES EN COULEUR.

# PLANCHE 1

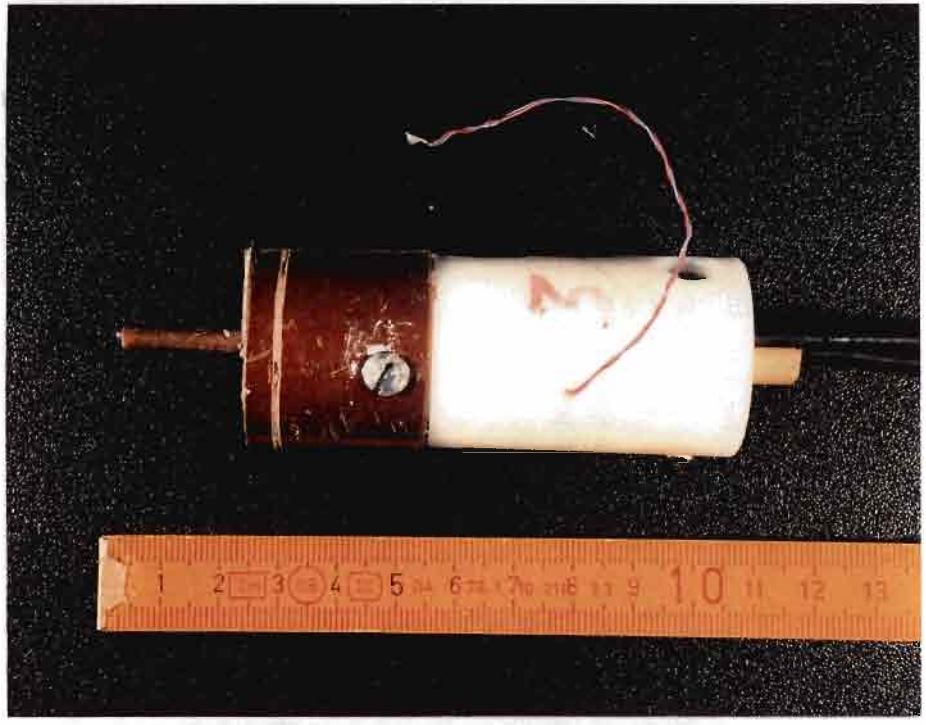
**PHOTO n°1** : Détail de la tête de la sonde 2. On remarque la rainure contenant l'élément chauffant et la soudure chaude à l'extrémité du tube central. La sonde 1 a le même aspect, à la différence de la gorge isolante, emplie d'un mastic isolant.

**PHOTO n°2** : Vue d'ensemble de la sonde 2. On remarque à droite la sortie des câbles d'alimentation de la résistance et de raccord à l'amplificateur. Dans la partie centrale du corps de sonde se trouve le trou de passage du fil comportant la soudure froide.

**PHOTO n°3** : Vue d'ensemble de la sonde 3. On peut noter la conception en deux parties du capteur : une tête en bakélite et un corps en polyéthylène, moins cher et plus facile à usiner. Les autres caractéristiques sont celles de la sonde 2.

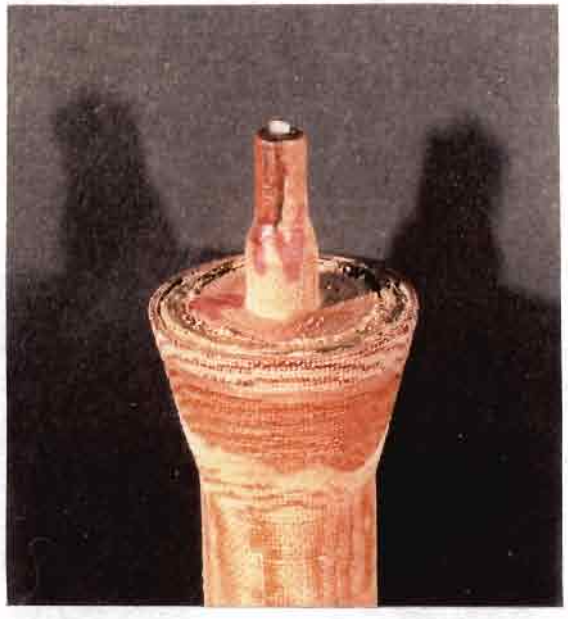
**PHOTO n°4** : Détail de la tête de la sonde 3. On remarque la rainure contenant l'élément chauffant usinée sur le bord du tube bakélisé. La gorge, plus grande que pour la sonde 1 est emplie du même mastic isolant. La vis située en partie basse sert à fixer la tête de sonde sur le support en polyéthylène.

PLANCHE 1



3

4



1

2

# PLANCHE 2

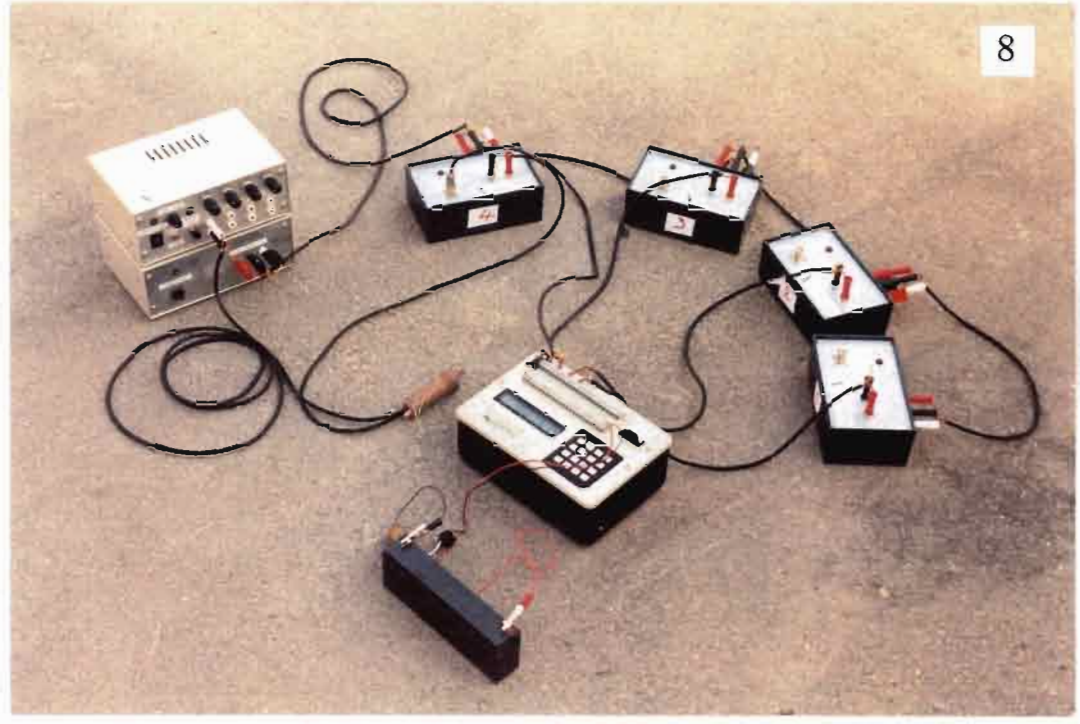
**PHOTO n°5** : Vue d'ensemble de la sonde 2 et des câbles de connexion. Le raccordement à l'amplificateur se fait par la fiche "BNC" (à droite). L'alimentation de la résistance se fait grâce aux deux "fiches banane".

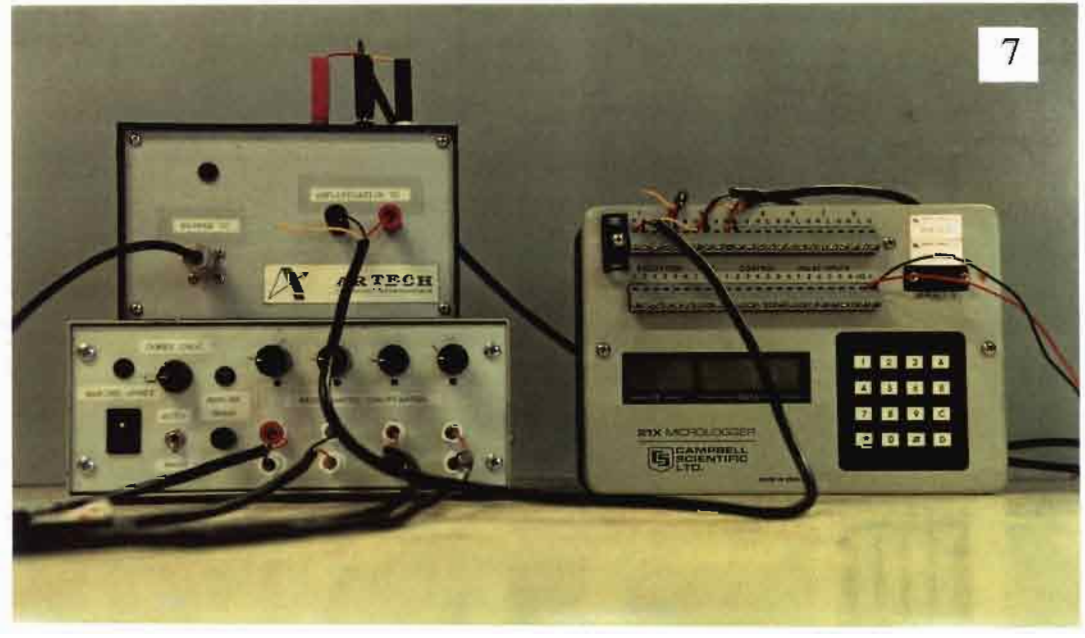
**PHOTO n°6** : Mise en place des sondes 2 et 3 sur la surface du milieu à caractériser. On remarque la soudure froide qui plonge dans le récipient empli d'eau. On distingue également le récipient isolant en polystyrène contenant le sol (ici le sable utilisé pour les étalonnages). Cette disposition à été employée tout au long des essais de laboratoire, mais aussi sur le terrain .

**PHOTO n°7** : Vue représentant le boîtier émetteur de chocs (en bas et à gauche), sur lequel repose un boîtier amplificateur. On distingue les différentes commandes de l'émetteur et le départ des câbles d'alimentation des résistances. L'amplificateur est raccordé à la centrale de mesure 21 X, à droite. On remarque sur l'avant de ce boîtier la connexion du thermocouple par fiche "BNC", et les trois fiches d'alimentation en tension sur le dessus.

**PHOTO n°8** : Vue d'ensemble de la chaîne de mesure, comprenant de gauche à droite : les batteries d'alimentation des amplificateurs (boîtier inférieur), l'émetteur de chocs, les quatre amplificateurs, la centrale de mesure et son alimentation. Pour la clarté du cliché, on n'a connecté qu'une sonde. Le câble de commande de l'émetteur de choc n'est pas figuré.

PLANCHE 2





## ABSTRACT

Twenty years ago, ORSTOM scientists developped a soil moisture measurement method using an unsteady temperature signal. This one consits in applying a heat pulse to the soil with a "double-rod" type probe and measuring the temperature leap of a well defined point of the medium. The authors proved that there was a simple relation between the soil moisture and the maximum of temperature increase.

Successive tests, particularly in Africa, have shown that the method was very interesting, but practically unusable because of problems of mechanical instability of probes. Actually, the two rods of the probe, the one holding the heating wire and the other a thermocouple, can move as they are driven in the soil, and the measurement is very sensitive to this parameter.

As the organism VERSEAU (Valorisation des Etudes et Recherches dans les Sciences de l'Eau) has granted a financial help for the year 1991, the ORSTOM hydrology department started new researches to develop a heat pulse probe with circular heating element and adapted devices for the data treatment.

The whole theory of heating a soil by a heat pulse probe has been made during the very first phases of research, but it was necessary to adapt it to the new geometry of the probes. First of all, we have shown that the soil moisture $\theta$ was linked to the maximum temperature increase at the measurement point $\Delta T_{max}$ by the formula : $\theta = \alpha \beta 1/\Delta T_{max} - \gamma$, where $\alpha$, $\beta$ and $\gamma$ are parameters which depend respectly on the probe geometry, on the heat pulse (power and duration) and on soil. In a matter of fact, this relation is not very different from the initial one.

Tests at the laboratory and on site allow to valid this theoretical model. Then, we have made the standardization of the four probes, and we verified that it was universal. Finally, the comparison of this method with the TDR method (Time Domain Reflectivity) have shown that the results given by both of them were strongly linked.

Meanwhile, we have find out that defects in the measurement devices (interferences, sensibility to temperature, ...) have affect the measures. That is why some data must have been carefully used, and the outcomes have not always been very precise.

Nevertheless, we have conclued that on certain conditions, the heat pulse method is well adapted to ponctual moisture measurement in soils, particularly in small volumes.



## KEY WORDS

soil moisture - measurement - heat pulse probe - prototype - conception - standardization

D.E.A. Sciences et Techniques de l'Eau
Université Louis Pasteur - Institut de mécanique des fluides/ENITRTS Strasbourg

# EXPERIMENTATIONS EN LABORATOIRE ET SUR LE TERRAIN VISANT A TESTER UN PROTOTYPE DE SONDE DE MESURE DE L'HUMIDITE DU SOL

## Evaluation de la précision et de la fiabilité de la méthode des chocs thermiques

Auteur: Christophe PEUGEOT 131 pages, 24 réf. biblio. paru en 1991

Laboratoire d'accueil : Laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM, centre ORTSOM de MONTPELLIER
911, Avenue Agropolis, BP 5045 34032 MONTPELLIER

## RESUME

Il y a une vingtaine d'années, des chercheurs de l'ORSTOM ont développé une méthode de mesure de la teneur en eau des sols par chocs thermiques. Celle-ci consiste à appliquer au sol une impulsion de chaleur (un "choc" thermique) grâce à une sonde dite "bi-tige" et à mesurer l'élévation de température provoquée en un point du sol. Les auteurs ont montré que l'humidité volumique était liée à l'élévation maximale de température par une relation simple.

Après plusieurs séries d'essais, en Afrique notamment, la méthode, quoique séduisante, s'est révélée inutilisable sur le terrain pour des raisons d'instabilité mécanique des capteurs. En effet, les deux tiges de la sonde, l'une supportant l'élément chauffant filiforme, l'autre un thermocouple, ne conservent pas un écartement constant lorsqu'on les met en place et la mesure est extrêmement sensible à ce paramètre.

En 1991 le laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM a repris ces recherches pour développer un prototype de sonde à chocs thermiques à élément chauffant circulaire et une chaîne de mesure adaptée.

La théorie complète de l'échauffement d'un sol sous l'effet d'une impulsion de chaleur a été établie lors des premières études, mais il était nécessaire de l'adapter à la nouvelle géométrie du capteur. Nous avons donc montré, dans un premier temps, que la teneur en eau $\theta$ d'un sol était liée à l'élévation maximale de température au point de mesure $\Delta T_{max}$ par une relation du type $\theta = \alpha.\beta.1/\Delta T_{max} - \gamma$, où $\alpha$, $\beta$ et $\gamma$ sont des paramètres qui ne dépendent respectivement que de la géométrie du capteur, des caractéristiques des chocs thermiques (puissance et durée) et du sol. Cette relation est du reste peu différente de la relation initiale.

Des tests en laboratoire et sur le terrain ont permis de valider ce modèle théorique. Nous avons ensuite procédé à l'étalonnage des quatre capteurs et vérifié qu'il était universel. Enfin, nous avons comparé la méthode à la méthode TDR (Time Domain Reflectivity), et montré une bonne corrélation entre les résultats.

Nous avons cependant constaté des imperfections (parasites occasionnels, sensibilité à la température,...) dans la chaîne de mesure et celles-ci ont affecté les mesures. Certaines données ont donc dû être exploitées avec prudence, et la précision des résultats n'a pas toujours été très bonne.

Néanmoins, nous avons pu conclure que, moyennant certaines conditions, la méthode des chocs thermiques dans sa nouvelle version était adaptée à la mesure ponctuelle de l'humidité des sols.

## MOTS CLES

humidité du sol - mesure - sondes à chocs thermiques - prototype - conception - étalonnage.