HAL
open science

Etude des performances d'un prototype sonde capacitive pour la mesure in situ de la teneur en eau du sol

J.C. Gaudu

To cite this version:

J.C. Gaudu. Etude des performances d'un prototype sonde capacitive pour la mesure in situ de la teneur en eau du sol. 46 p., 1989. hal-02855617

HAL Id: hal-02855617

https://hal.inrae.fr/hal-02855617

Submitted on 8 Jun 2020

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

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

ETUDE DES PERFORMANCES D'UN PROTOTYPE DE SONDE CAPACITIVE POUR LA MESURE IN SITU DE LA TENEUR EN EAU DU SOL

INRA
UNITE REGIONALE DE DOCUMENTATION
Domaine Saint Paul - Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9

J.C. GAUDU

Institut National de la Recherche Agronomique
Centre de Recherches d'Avignon
Domaine Saint Paul BP-91
84140 MONTFAVET (France) 1989

1 INTRODUCTION
2 PRINCIPE DE LA MESURE
21 Notion de diélectrique et phénomènes de polarisation
22 Propriétés diélectriques des sols
23 Analogie électrique de base
3 PRESENTATION SOMMAIRE DU CAPTEUR
31 Choix de la fréquence
32 Principe de la double mesure de fréquence
33 Réjection de la composante conductive de la permittivité
34 Géométrie des électrodes
4 VERIFICATION AU LABORATOIRE DES PRINCIPALES PROPRIETES DU CAPTEUR
41 Influence de la température sur la réponse du capteur
411 Protocole expérimental
412 Résultats
42 Volume de mesure et géométrie des électrodes
421 Méthode d'approche du volume de mesure
422 Description des géométries testées.
423 Comparaison des résultats et conséquences
43 Corrosion des électrodes: électrodes inoxydables ou revêtement des électrodes, quelle voie choisir?
44 Effets de main, sensibilité actuelle à des défauts du courant d'alimentation.
5 FACTEURS D'INFLUENCE DE LA PERMITTIVITE DES SOLS, ETUDE EXPERIMENTALE AU LABORATOIRE
51 Facteurs d'influence de la permittivité diélectrique des sols
52 Protocole de l'étude expérimentale au laboratoire
521 Protocole général
522 Recherche du rôle de la texture
523 Expérimentation sur le rôle de la température
524 Recherche de l'effet structural
525 Recherche de l'effet de la salinité
5251 Essai sur échantillon de sol
5252 Essai sur solutions de concentrations variables
53 Résultats
531 Influence de la texture du sol
532 Effet de la température sur la permittivité diélectrique des corps et du sol en particulier
533 Influence de la structure du sol
534 Influence de la composition de la solution du sol
54 Conclusion partielle de l'expérimentation au laboratoire; hiérarchisation des facteurs et conclusions sur le mode d'étalonnage à adopter
6 EXPERIMENTATION AU CHAMP
61 Objectifs de l'expérimentation au champ
62 Présentation des dispositifs expérimentaux
621 Expérimentation sur le site de POIRSON
622 Expérimentation "COLLIAS"
63 Résultats
631 Conséquences des propriétés locales de la mesure
6311 Evolution temporelle de la permittivité
6312 Rôle de la température
6313 Infiltration d'une lame d'eau sur le site de collias
632 Etalonnage des capteurs
6321 Résultats Collias
6322 Résultats Poirson
7 CONCLUSIONS: BILAN DE L'EXPERIMENTATION, CONSEQUENCES SUR L'EVOLUTION DU CAPTEUR ET SUR LES AMELIORATIONS A APPORTER AU CAPTEUR ACTUEL.APPORTS DE CETTE TECHNIQUE.

1 INTRODUCTION.

La méthode capacitive de détermination de la teneur en eau volumique des sols est basée sur la relation existant entre les propriétés diélectriques des sols et leur teneur en eau. Le sol, placé entre les armatures d'un condensateur de géometrie donnée en détermine la capacité. On mesure alors soit la valeur de la capacité (Farad) avec un système de mesure en pont, soit la valeur de la fréquence (Hertz) de résonnance d'un circuit incluant la capacité constituée.

Les divers principes retenus permettent une détermination rapide et automatisable de la teneur en eau. La mesure est non destructive: un nombre illimité de répétitions peut être réalisé en un même endroit du sol. Le volume de sol affecté par la mesure est de petites dimensions, il permet l'étude de phénomènes qui se déroulent sur une échelle spatiale d'ordre centimétrique. La permittivité est très sensible à la teneur en eau du sol, mais également à d'autres de ses caractéristiques: sa température, sa texture et sa structure, la composition chimique de sa solution.

Les avantages potentiels de cette méthode de mesure ont incité la Station de Science du Sol de l'I.N.R.A. de MONTFAVET à procéder à son étude. L'I.N.R.A. s'est adressé en 1986 à L'I.U.T. de MARSEILLE pour l'étude et la réalisation de la partie électronique d'un capteur basé sur ce principe, et correspondant à un cahier des charges visant à satisfaire les besoins des physiciens des sols.

De son côté, l'I.N.R.A. a pris en charge:

- 1 - une étude des performances du capteur, notamment au regard des contraintes recensées au champ;
- 2 - l'optimisation de la géométrie des électrodes du capteur;
- 3 - une étude plus générale au laboratoire de la relation entre les propriétés diélectriques des sols et leur teneur en eau débouchant sur la recherche d'un protocole opérationnel d'étalonnage et de mise en oeuvre de cette technique.
- 4 - une évaluation des apports de cette méthode en général, et du capteur réalisé en particulier, en conditions réelles d'utilisation au champ.

2 PRINCIPE DE LA MESURE.

21 Notion de diélectrique et phénomènes de polarisation.

Un diélectrique est un corps qui peut emmagasiner de l'énergie électrostatique. Placé entre les armatures d'un condensateur, un diélectrique parfait est susceptible de maintenir constante une tension aux bornes de ce dernier, sans autre apport d'énergie. Cette propriété résulte de phénomènes de polarisation des porteurs de charges liés. Dans le cas d'un diélectrique réel, tel le sol, des porteurs libres se déplacent sous l'effet du champ électrique donnant lieu à des phénomènes de conduction électrique. Interviennent également des déperditions d'énergie par effet Joule liés à l'existence de forces de frottement. Lorsque le champ appliqué est alternatif, la conduction et les frottements sont à l'origine d'un déphasage retard de la polarisation par rapport au champ appliqué. Pour traduire ces phénomènes, on adopte alors une notation complexe dans l'expression de la permittivité.

$$\epsilon = \epsilon' - j\,\epsilon''$$

ϵ : permittivité diélectrique complexe (sans dimension)

ϵ' : composante réelle de la permittivité, elle traduit l'aptitude du diélectrique à se polariser.

ϵ'': composante immaginaire traduisant les phénomènes de pertes diélectriques responsables de déphasages entre le champ appliqué et la polarisation.

FIG. 1: BASES DE L'ANALOGIE ELECTRIQUE UTILISEE POUR LA REPRESENTATION DES PROPRIETES DIELECTRIQUES DES SOLS.

Condensateurs:

Si un condensateur comporte du vide entre ses armatures, sa capacité s'écrit:

$C_0 = \varepsilon_0 \times S/d$

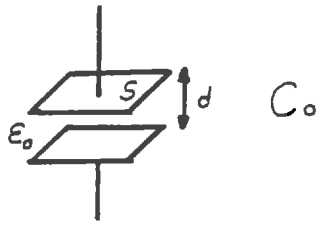
C_0: Farad (F)

ε_0: permittivité absolue du vide

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m

S : surface des armatures (m^2)

d : distance entre les armatures (m)



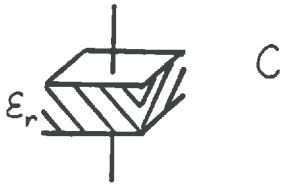
Lorsqu'il comporte un diélectrique réel entre ses armatures, on écrit:

$C = \varepsilon_r C_0$

ε_r: permittivité diélectrique relative du matériau diélectrique (sans dimension)

ε_r est de la forme $a-jb$ (notation complexe).

$\varepsilon_r = \varepsilon_r - j\varepsilon_r''$



Condensateurs parfaits-réels

Un condensateur, constitué avec un diélectrique parfait n'est pas traversé par le courant électrique.

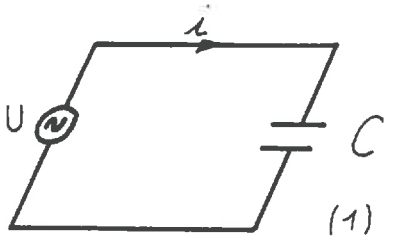
Un condensateur (C), constitué avec un diélectrique comportant des porteurs de charges libres laisse passer le courant. Il peut être représenté par une association en parallèle d'un condensateur parfait (γ) et d'une résistance de fuite (ρ).

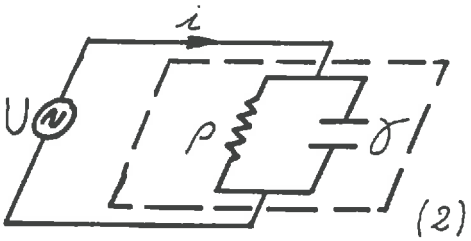
L'application de la loi d'Ohm donne, pour l'expression du courant:

pour (1): $\bar{I} = j C\omega . U e^{j\omega t}$ avec $C = \varepsilon_r \gamma_0$

$\bar{I} = j\gamma_0\omega(\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'') . U e^{j\omega t}$

pour (2): $\bar{I} = (1/\rho - j\gamma\omega) . U e^{j\omega t}$



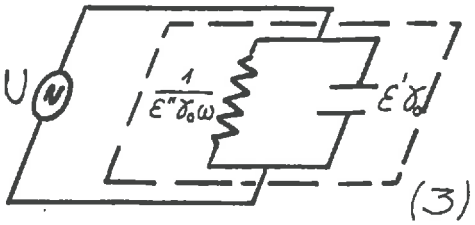


Par identification des deux expressions du courant, il vient:

$1/\rho - j\gamma\omega = \varepsilon_r' \gamma_0\omega - j\varepsilon_r'' \gamma_0\omega$

avec: $\varepsilon_r'' = 1/\rho\gamma_0\omega$ et $\varepsilon_r' = \gamma/\gamma_0$

Le schéma par analogie du condensateur avec pertes devient alors (3):



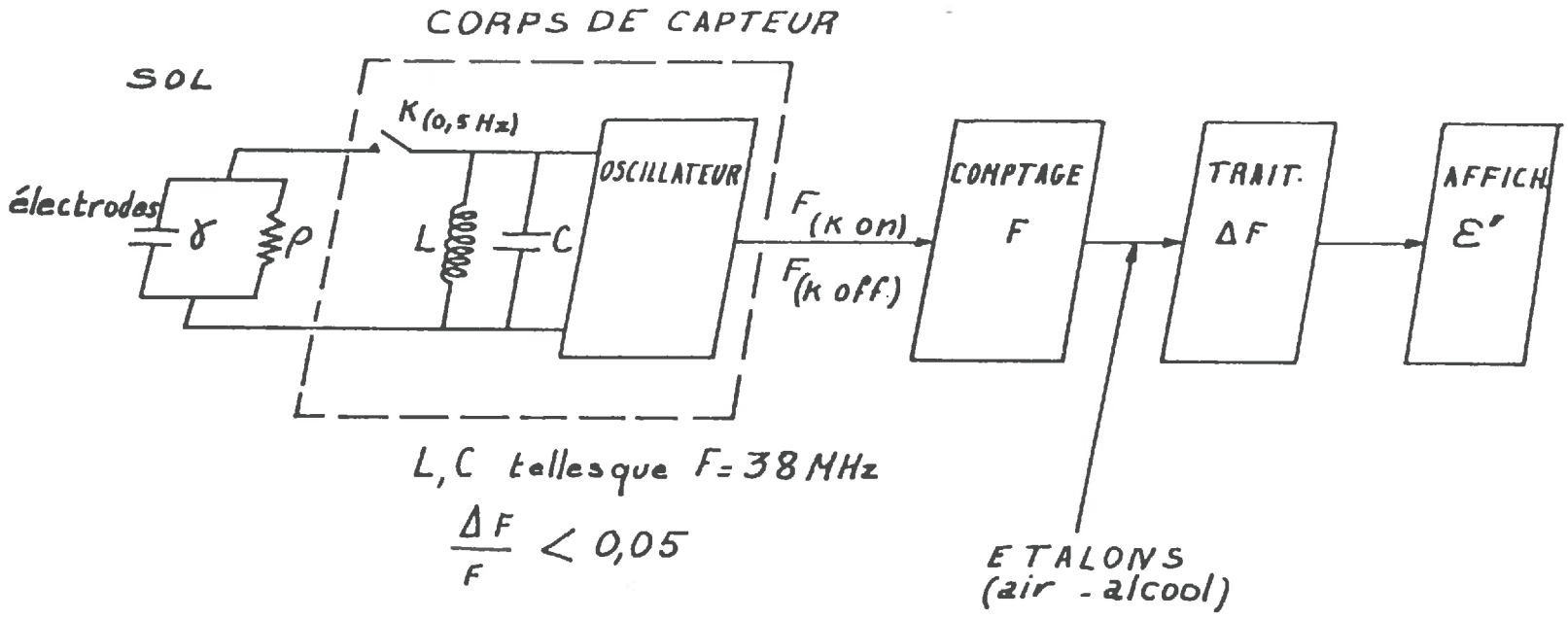
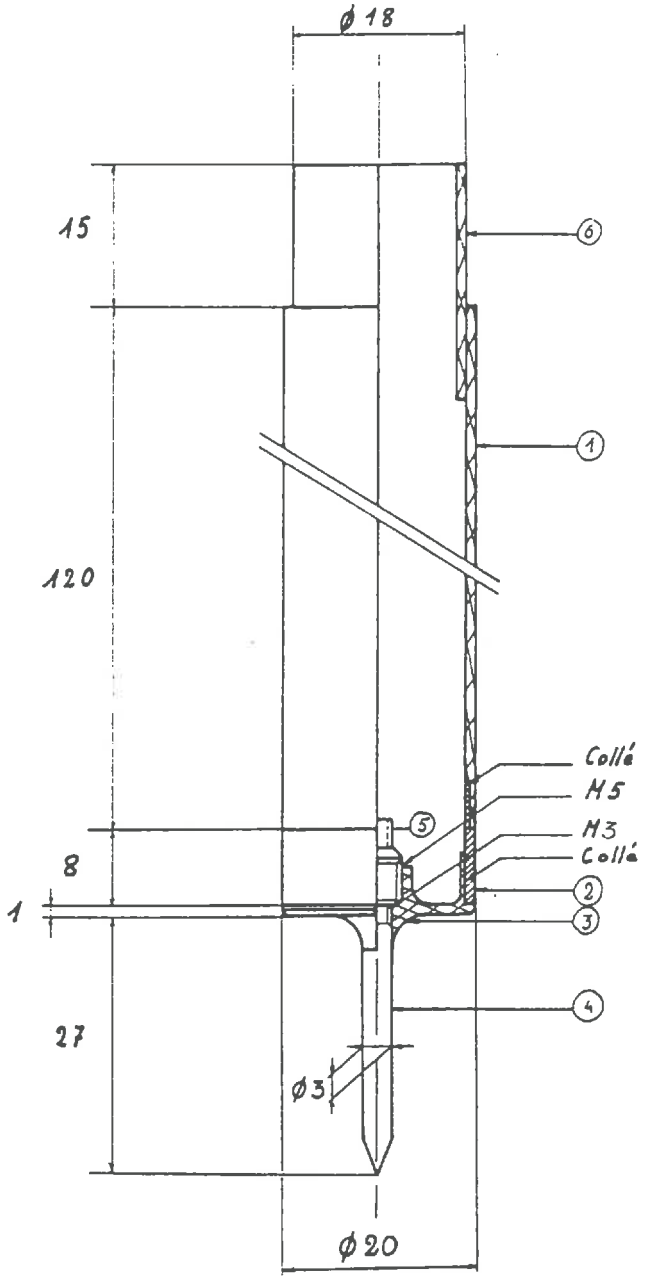


FIGURE 2: SCHEMA DE PRINCIPE DU CAPTEUR

FIGURE 3: PARTIE MECANIQUE DU CAPTEUR A POINTE



Corps de sonde	1	P.V.C.	
Electrode annulaire	2	acier inoxydable	
Bouchon isolant	3	nylon	
Electrode pénétrante	4	acier inoxydable	collage sur 3 (étanchéité)
Intermédiaire	5	acier doux	collage sur 3 (étanchéité)
Manchon de raccord	6	P.V.C.	pour rallonge éventuelle
Désignation	N°	Matière	Observations
Ech: 1,25	I.N.R.A. Science du Sol		20.01.89

SONDE A ELECTRODES MONOAXIALES

22 Analogie électrique de base.

Le principe de la mesure consiste à introduire deux électrodes dans le sol. Le système ainsi constitué est alors assimilé, du point de vue électrique à un condensateur avec pertes, (capacité parfaite avec résistance de fuite en parallèle: FIG. 1). Dans le cas qui nous concerne, le condensateur ainsi constitué est inséré dans un circuit dont on mesure les variations de fréquence de résonnance liées à la valeur de la capacité introduite.

23 Propriétés diélectriques des sols.

Le sol est un système triphasique, composé d'une matrice solide présentant des pores occupés en proportions variables par des gaz et une solution aqueuse. Son comportement diélectrique traduit la permittivité de chacun de ses composants élémentaires. Mais du fait d'interactions complexes entre les différentes phases, aucune loi simple ne permet de prédire son comportement diélectrique global à partir de la seule connaissance des proportions relatives de chacun de ses constituants. Toutefois, le rôle de la teneur en eau sur sa permittivité s'explique par le fort contraste existant entre la permittivité diélectrique de l'eau libre et celle de ses autres constituants.

permittivité de l'eau libre : $\epsilon' = 80$
permittivité de l'air : $\epsilon' = 1$
permittivité de la phase solide: $2 < \epsilon' < 10$

3 PRESENTATION SOMMAIRE DU CAPTEUR.

Les considérations théoriques ayant servi à élaborer le circuit électronique du capteur sont exposées dans le projet de publication accompagnant le présent document (MATHIEU & Al). Nous nous limiterons donc ici à rappeler les grandes caractéristiques du capteur réalisé.

La miniaturisation du circuit électronique a été recherchée, de telle sorte que celui-ci puisse être introduit dans un capteur de petites dimensions, au plus près des électrodes. La partie active du capteur occupe un cylindre de 18 mm de diamètre et 100 mm de longueur comportant les électrodes de polarisation à son extrêmité.

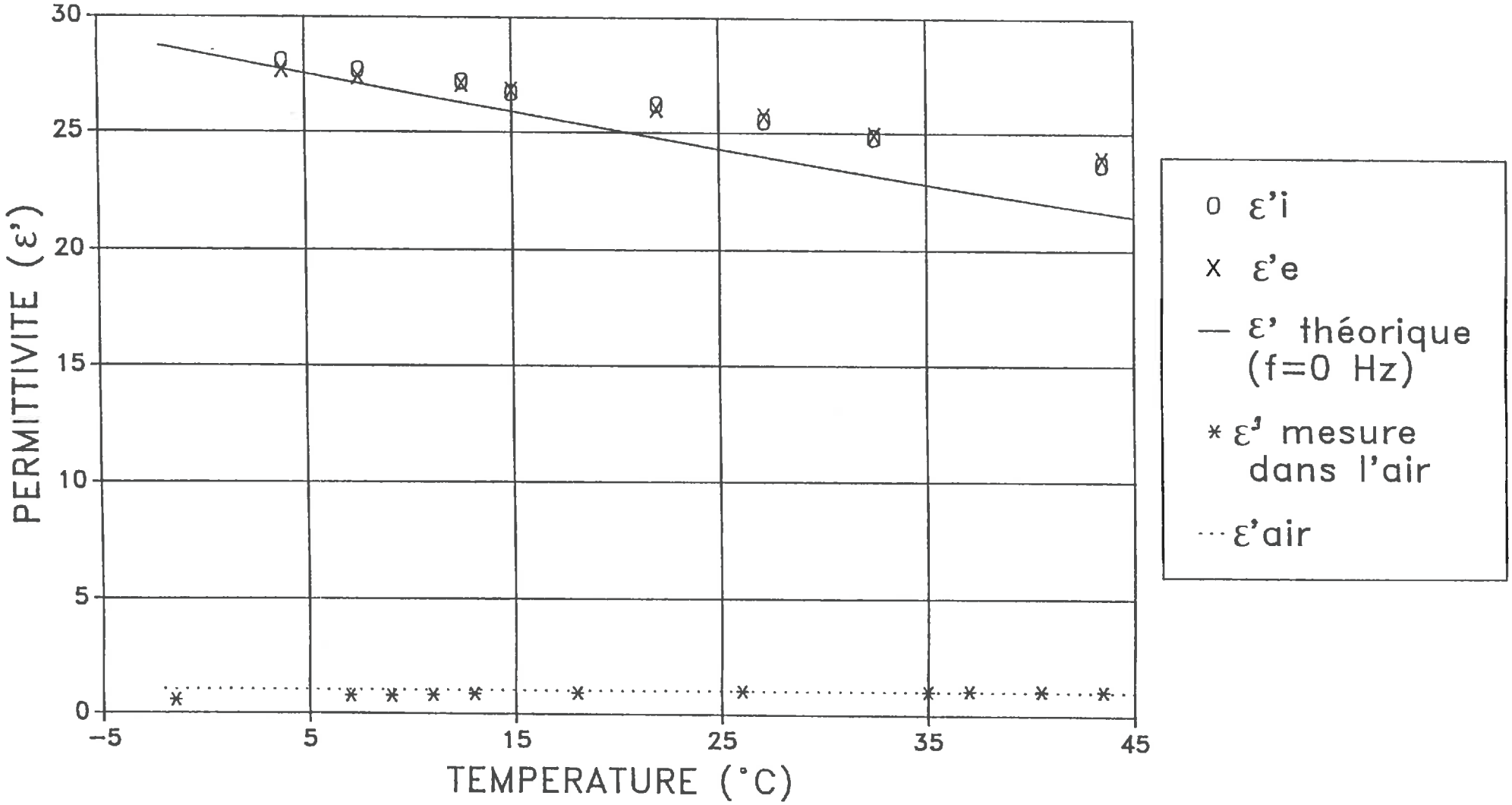
31 Choix de la fréquence.

Le circuit oscille à une fréquence nominale de 38 MHz. Le choix de la fréquence est lié au spectre hertzien du système sol humide-électrodes. La bande 0Hz-1MHz est particulièrement affectée par les phénomènes de polarisation des électrodes et par la polarisation de l'eau adsorbée. Dans le domaine des faibles fréquences, les phénomènes liés à la conductivité électrique sont par ailleurs très importants. Il est généralement admis que dans la bande 10-20 MHz à quelques GHz, la permittivité diélectrique du sol est principalement liée à sa teneur en eau. Il est par ailleurs peu envisageable d'utiliser actuellement des technologies permettant d'accéder à des fréquences supérieures à 50 MHz, dans le cadre des contraintes économiques fixées.

32 Principe de la double mesure de fréquence.

Le cahier des charges livré à l'I.U.T. de Marseille prévoyait une utilisation au champ du capteur. Dans les conditions d'utilisation recensées, les variations de température sont parmi les plus contraignantes. L'ensemble du dispositif doit fonctionner dans une plage de température allant de 0 °C à + 45°C, sans que des dérives liées à l'appareillage ne perturbent la mesure. Un principe de double mesure de fréquence est mis en oeuvre à cette fin (Fig.2: schéma de principe du capteur). Le capteur est doté d'un commutateur actionné à une fréquence de 0,5 Hz, permettant d'isoler le circuit des électrodes à chaque période de commutation. Deux mesures de fréquence sont alors effectuées, avec et sans prise en compte de la capacité du sol. La différence de fréquence obtenue est alors uniquement fonction le la valeur de la capacité constituée par le système électrodes-sol; cette mesure

FIG. 4: EFFET DE LA TEMPERATURE
SUR LES COMPOSANTS DU CAPTEUR



ne prendra dès lors plus en compte les éléments capacitifs et inductifs propres au capteur et sujets à dérives thermiques. Par ailleurs, le circuit est optimisé pour que l'excursion en fréquence ne dépasse pas +/- 5 % la fréquence nominale. Un étalonnage avec des milieux de permittivité connues (air: $\epsilon' = 1$ et alcool: $\epsilon' = 25$) permet la conversion des valeurs de fréquences obtenues en valeurs de permittivité; la linéarité de la relation permittivité réelle-permittivité mesurée est vérifiée au moyen de capacités étalons (MATHIEU & Al).

33 Réjection de la composante conductive de la permittivité.

La réjection de l'influence de la conductivité électrique sur la mesure de sa permittivité est recherchée; les phénomènes de conduction sont en effet très influencés par la teneur en sels de la solution du sol. Le principe du dispositif fait l'objet d'une description dans la note d'accompagnement. La réjection est opérationnelle dans une gamme de conductance allant jusqu'à 5 milli-Siemens (mS).

34 Géométrie des électrodes.

Parmi les réalisations recensées on peut classer la géométrie des électrodes en deux grands types:

- disposition monoaxiales des électrodes: deux électrodes annulaires sont disposées sur le corps généralement cylindrique du capteur.
- disposition biaxiale ou pluriaxiale des électrodes, à l'extrêmité d'un corps de capteur de forme cylindrique ou autre.

On note également des dispositions spéciales sur des réalisations destinées à être disposées sur des bandes transporteuses pour le dosage de l'eau des sables à béton.

Une solution originale a été adoptée pour notre capteur(FIG.3). Celui-ci comporte deux électrodes monoaxiales:

- une électrode annulaire de hauteur 8 mm et de diamètre 20 mm,
- une électrode en pointe de 3 mm de diamètre et 27 mm de longueur disposée à l'extrêmité du corps cylindrique de la sonde.

Cette solution, discutée au paragraphe 423, préserve la facilité d'implantation des sondes monoaxiales, tout en permettant d'explorer un volume de matériau non perturbé plus important que celui déterminé sur les réalisations monoaxiales classiques.

4 VERIFICATION AU LABORATOIRE DES PRINCIPALES PROPRIETES DU CAPTEUR.

41 Tenue en température du circuit électronique.

La permittivité des matériaux varie avec leur température. Selon les matériaux, la variation peut être croissante ou décroissante. Pour valider les solutions adoptées par le concepteur, il convient donc de dissocier les variations thermiques propres au capteur de celles du diélectrique.

411 Protocole expérimental.

Dans un premier temps, les électrodes du capteur sont placées dans l'air. La permittivité de l'air est assimilable à celle du vide et ne varie donc pas avec la température. L'ensemble du dispositif est soumis à des températures comprises entre 0 °C et 40 °C en chambre climatique.

Dans une autre expérimentation, on porte un bain d'alcool à différentes températures. A chaque température, deux mesures de permittivité sont relevées:

- la première mesure (ϵ'i) est relevée instantanément après l'introduction de la sonde dans l'alcool, lorsque celle-ci est encore à la température de la pièce (20 °C).
- la seconde mesure (ϵ'e) est relevée lorsque la sonde est à l'équilibre thermique avec le bain (0 °C < T < 45 °C).

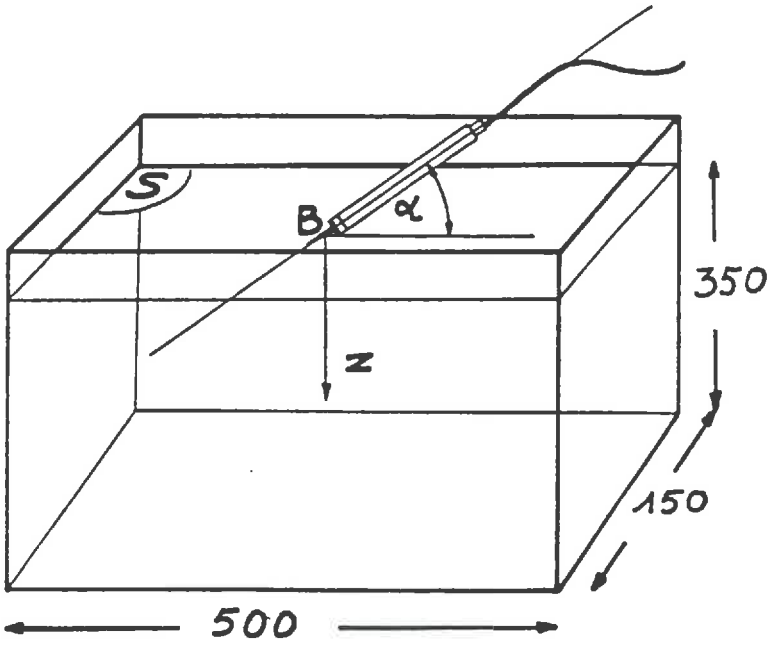


FIGURE 5: POSITION DU CAPTEUR DANS LE BAIN D'ALCOOL

FIG. 6: EFFET DE L'INTERFACE AIR
SUR LA MESURE DE LA PERMITTIVITE DE L'ALCOOL
(1 − ERREUR) = f (z) SONDE A POINTE

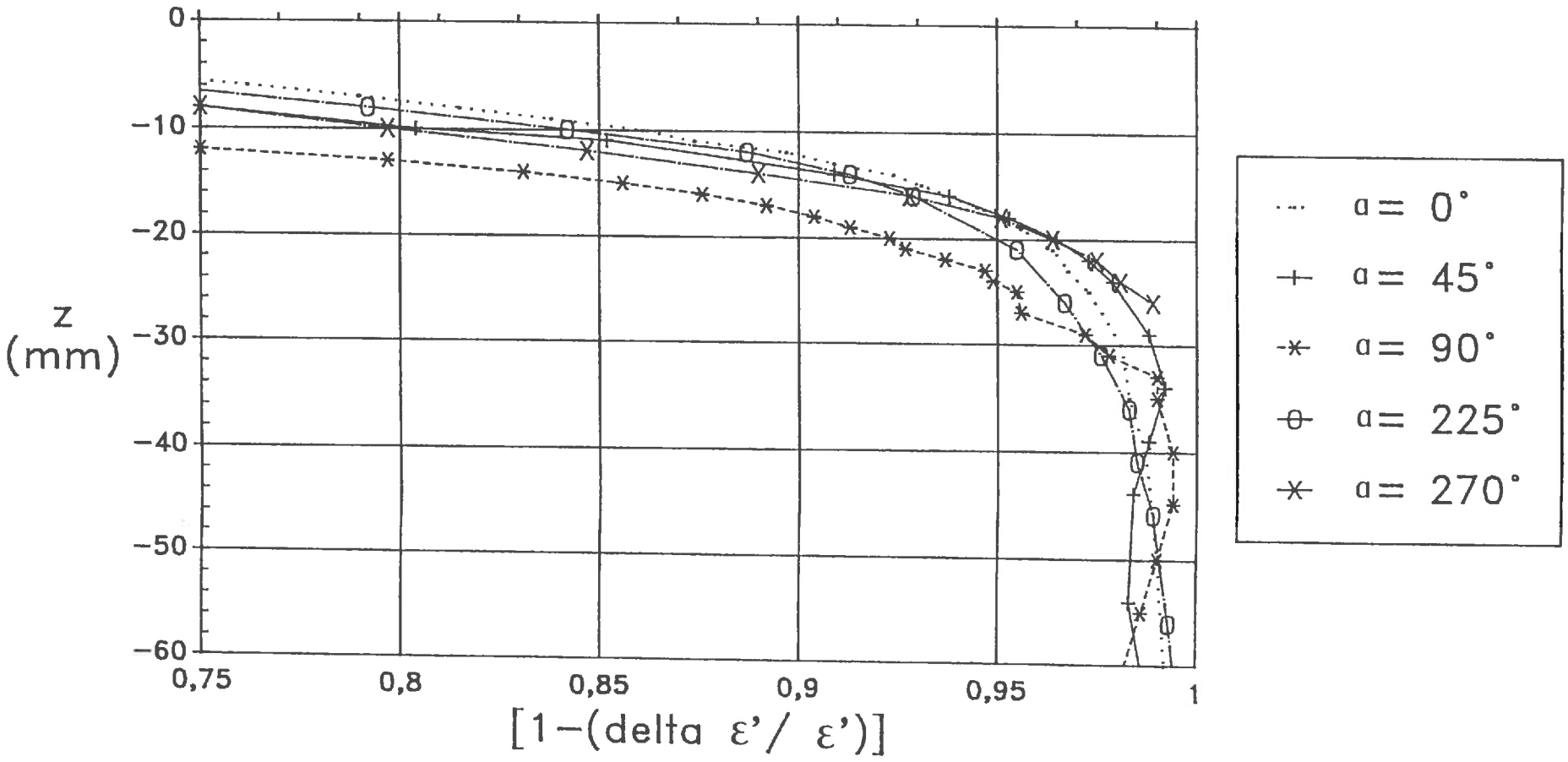


FIGURE 7: CONTOURS D'ISO-ERREUR POUR DIFFERENTES GEOMETRIES

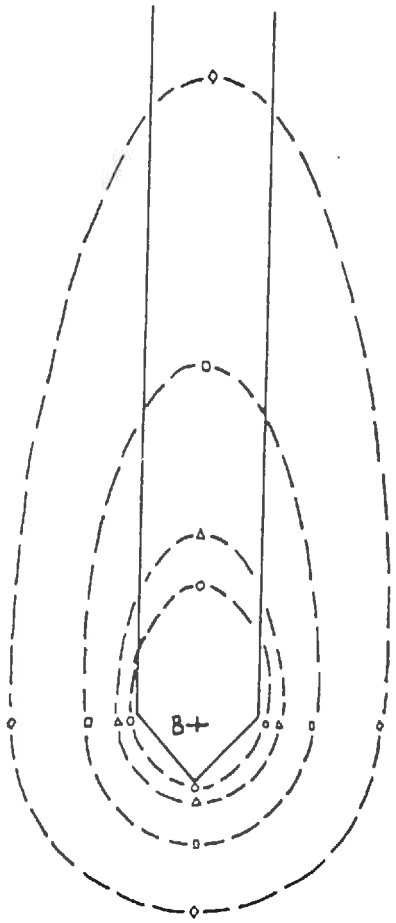


FIG.7A: SONDE A EMBOUT CONIQUE

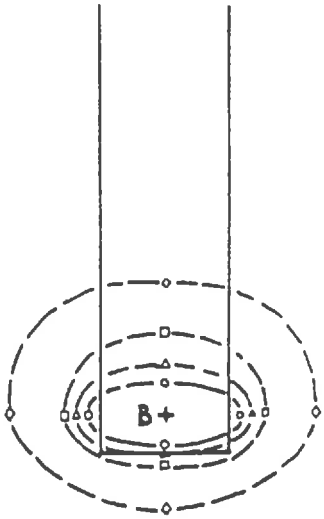
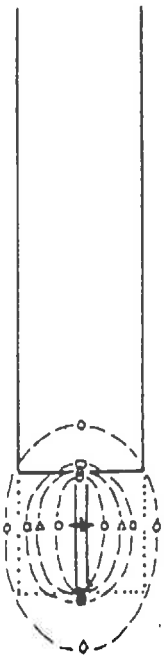


FIG.7B: SONDE CYLINDRIQUE



G.7C: SONDE MULTIELECTRODES

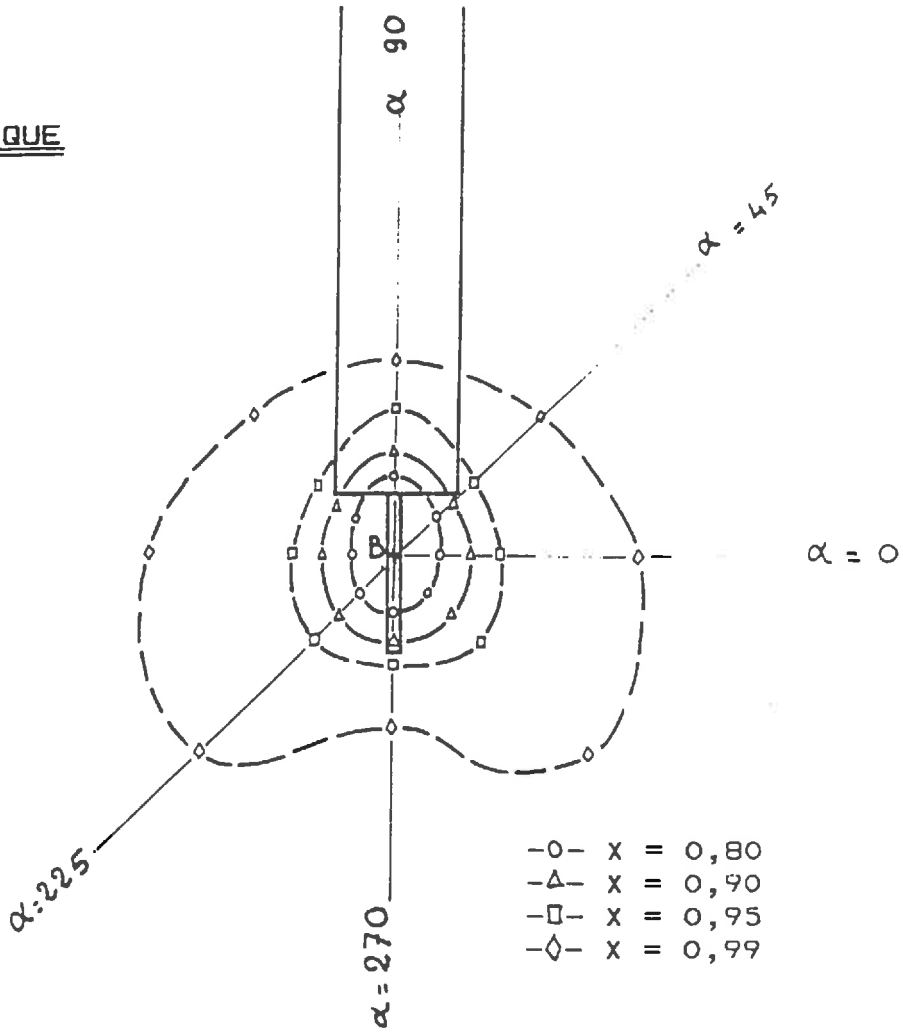


FIG.7D: SONDE A POINTE

La différence mesurée n'est alors imputable qu'aux variations de comportement du capteur entre les deux situations.

412 Résultats.

Les résultats de ces expériences (FIG. 4) font apparaître une faible variation d'origine thermique liée au capteur, elle atteint au maximum 0,5 points de permittivité. Cette variation représente sur la teneur en eau une erreur d'environ $2{,}4*10^{-4}$ $m^3.m^{-3}/°C$. Le dispositif de double mesure peut donc être considéré comme une solution efficace. La légère dérive observée peut par ailleurs être imputée à la variation de permittivité des électrodes ou de l'isolant qui les séparent.

42 Volume de mesure et géométrie des électrodes.

421 Méthode d'approche du volume de mesure.

Pour tenter de caractériser le volume de mesure de la sonde, on introduit celle-ci dans de l'alcool (aux propriétés diélectriques proches de celles d'un sol humide) contenu dans un récipient de grandes dimensions (L=500 mm, l=150 mm, h=350 mm) (FIG.5). La proximité de l'air introduit une erreur sur la mesure de la permittivité de l'alcool.

Le barycentre (B) du volume de mesure est défini de la manière suivante: lorsqu'il est inclus dans le plan formé par la surface du liquide, la valeur de permittivité mesurée ($\epsilon' = 13$) est égale à la moyenne des permittivités de l'air ($\epsilon' = 1$) et de l'alcool ($\epsilon' = 25$). Des mesures sont effectuées pour différentes cotes (z) d'enfoncement du barycentre dans le liquide. Lorsque la distance surface-barycentre augmente, la permittivité mesurée augmente pour tendre vers celle de l'alcool. On établit une relation expérimentale entre le complément à 1 de l'erreur relative sur la permittivité de l'alcool [1-(delta ϵ'/ϵ')] et la cote d'enfoncement de la sonde dans le liquide (FIG.6).

L'opération est répétée en disposant l'axe de la sonde selon plusieurs angles (α) formés avec la surface du liquide.

On repère sur les différentes courbes expérimentales les distances correspondant à différents critères d'erreur choisis: [1-(delta ϵ'/ϵ')] = 0,80 - 0,90 - 0,95 - 0,99 = X.

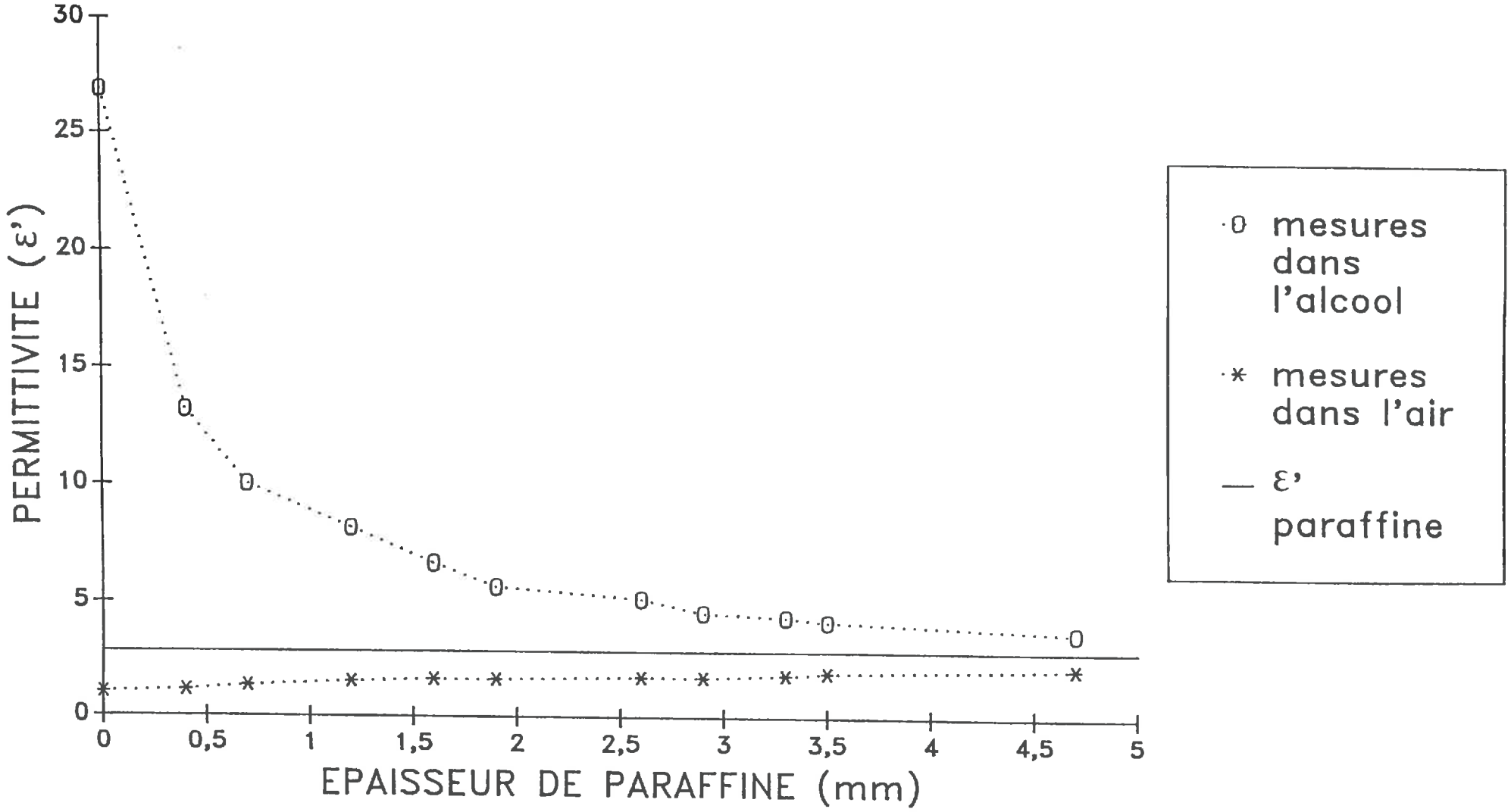
Pour chaque critère, on reporte ces distances sur des demi-droites ayant pour origine le barycentre B, et formant un angle (α-$\Pi/2$) avec l'axe du capteur. Les points d'égale erreur sont reliés entre eux pour constituer des contours d'iso-erreur ou d'iso-influence de la proximité de l'air sur la mesure de la permittivité de l'alcool (FIG. 7). On admet une symétrie de révolution pour les géométries testées. De cette manière, on délimite un volume de référence, pour le critère X choisi, tel qu'au delà, la mesure soit au moins égale à: $\epsilon'_{(alcool)} * X$.

422 Description des géométries testées.

Plusieurs sondes de géométries différentes ont été testées avec le protocole défini au paragraphe 421:

- Une sonde A à embout cônique, comportant une électrode annulaire et une électrode cônique. Cette sonde, constituant le premier prototype, était dotée d'un corps en cuivre destiné à l'isolement du circuit (FIG. 7a).
- Une sonde B comportant une électrode annulaire, et une électrode cylindrique située à l'extrêmité du capteur (FIG. 7b).
- Une sonde C comportant quatre électrodes en pointes de 20 mm de longueur. Trois de ces électrodes de même polarité sont disposées à 120 degrés sur une couronne au diamètre de la sonde, et une électrode de polarité inverse est implantée au centre de la couronne, en position axiale (FIG. 7c).
- Une sonde D comportant une électrode annulaire et une électrode en pointe située à son extêmité, en position axiale (FIG. 7d).

FIG. 8: SIMULATION D'UNE LAME D'AIR AUTOUR DU CAPTEUR



423 Comparaison des résultats et conséquences.

Sur la sonde A on constate que les contours d'isoinfluence s'étendent le long du corps en cuivre du capteur. D'autre part, on constate que l'extension maximale du volume influencé par l'air est de l'ordre de 50 mm par rapport à l'axe du capteur (selon le critère 0,99). On constate que le volume délimité par le contour à 0.8 est situé au voisinage immédiat du corps de la sonde.

Sur les sondes B,C,et D, le cuivre constituant le corps de la sonde à été remplacé par du P.V.C.. Le phénomène d'extention des lignes le long du corps de la sonde a disparu. Très globalement, on constate que les contours d'iso-erreur ou d'iso-influence ont des dimensions du même ordre pour tous les capteurs. Cependant, pour les capteurs A et B, on remarque que le volume *effectif* de matériau contenu dans le contour 0,8 est très faible. Par contre, dans le cas de la sonde D, le volume effectivement contenu dans le contour à 0,8 est beaucoup plus important.

D'autre part on peut considérer que l'implantation des capteurs dans le sol perturbe le matériau sur une épaisseur variable à la surface du capteur. Dans le cas des capteurs A et B, les lignes d'influences sont tangentielles aux surfaces perturbées. Dans le cas des capteurs C et D, on peut penser que le volume relatif de matériau perturbé par les opérations d'implantation du capteur est plus faible, dans la mesure ou l'essentiel du sol pris en compte est rejeté hors de la zone perturbée par l'implantation.

Le choix de la géométrie de type C paraît intéressant. Cependant, pour des matériaux gonflants, le risque d'apparition de fentes de retrait entre les électrodes n'est pas nul. On peut penser qu'une telle situation engendrerait des erreurs de mesure.

Le choix définitif s'est porté sur la géométrie de type D. Cette géométrie est compatible avec une implantation opérée dans un avant trou percé à partir de la surface du sol. A cette facilité d'implantation peu perturbatrice, ce type de géométrie allie en partie le avantages d'une géométrie pluriaxiale des électrodes.

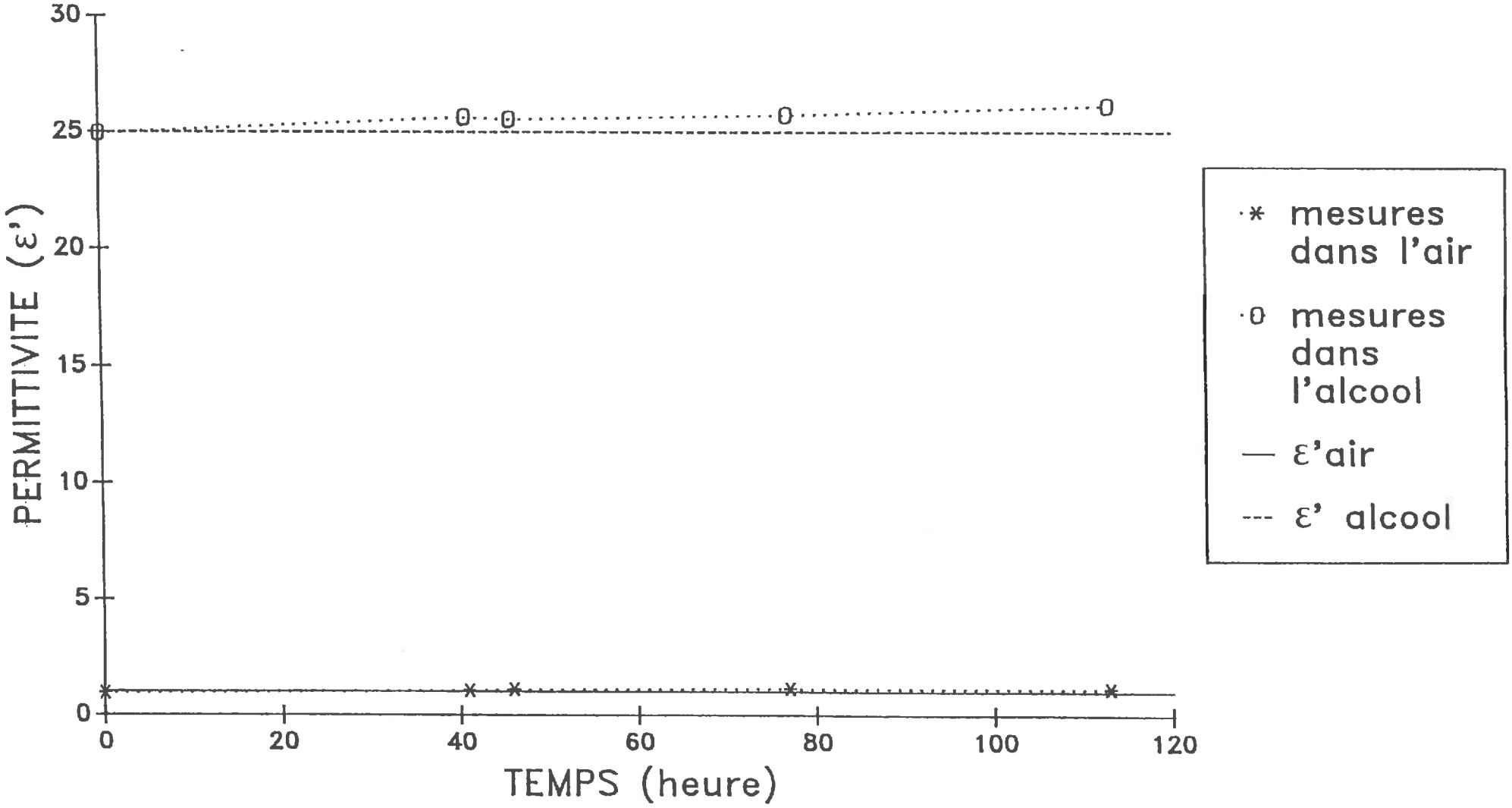
Une évaluation des risques potentiels générés par des phénomènes de retrait du sol autour de la sonde à été opérée pour la géométrie de type A. Après étalonnage de la sonde, une couche de paraffine d'épaisseur croissante est déposée autour du capteur par trempages successifs dans ce matériau à l'état liquide. Après chaque dépôt, une nouvelle mesure est réalisée dans l'air et dans l'alcool (FIG.8). A partir des valeurs nominales observées lorsque le capteur est nu (ϵ' alcool: 27, ϵ' air: 1), la permittivité mesurée tend vers celle de la paraffine (ϵ' paraffine = 2.7) au fur et à mesure que la couche de paraffine augmente. Pour la première couche de paraffine déposée (0,04 mm), on observe une diminution importante de la permittivité de l'alcool. Cette expérience conforte les résultats obtenus lors des manipulations visant à décrire le volume de mesure des sondes: les premières couches de matériau autour de la sonde ont une importance considérable sur la mesure pour ce type de géométrie. Une expérience identique a été tentée sur le capteur D. Malheureusement, l'écoulement de la paraffine liquide autour du capteur est plus difficile et sa répartition uniforme n'a pu être obtenue. L'interprétation des résultats relatifs à ce capteur à donc été compromise.

43 Corrosion des électrodes: électrodes inoxydables ou revêtement des électrodes, quelle voie choisir?

L'intérêt de tels capteurs réside en grande partie dans le fait qu'une fois mis en place dans le matériau étudié, ils permettent l'enregistrement automatique des informations en continu. Une durée de séjour longue dans le sol doit donc être prévue, sans que le capteur ne se dégrade physiquement, en particulier par corrosion des électrodes sous l'effet d'agents divers contenus dans la solution du sol.

En premier lieu, les électrodes doivent impérativement être réalisées en des matériaux de nature chimique identique et aucune composante continue du courant ne doit circuler entre les électrodes. Ces conditions étant réunies, des phénomènes de corrosion des électrodes peuvent subsister dans certains environnements.

FIG. 9: EFFET DE L'HYDRATATION DU REVETEMENT SUR LA MESURE



Deux solutions ont été utilisées.

La solution initiale a consisté à *protéger les électrodes du capteur* (type A) d'un revêtement isolant. Dans ce cas, le matériau isolant doit posséder deux qualités:

- Il doit être résistant à l'abrasion. Cette qualité ne doit pas se dégrader en présence d'eau.
- Il doit être stable dans le temps.

Malheureusement, la plupart des composés hydrocarbonnés présentent des propriétés hydrophiles et sont donc susceptibles d'évoluer au cours du temps par hydratation.

Le test du meilleur revêtement a été réalisé sur le capteur lui même. Le capteur ainsi revêtu à séjourné pendant plusieurs jours dans l'eau; à intervalles réguliers des mesures sont réalisées dans l'air et l'alcool. Les résultats de ce test (FIG.9) montrent qu'une certaine hydratation du revêtement s'opère au cours des premières dixaines d'heures de trempage, puis se stabilise relativement ensuite.

Cette solution, satisfaisante dans le cadre d'une utilisation en conditions contrôlées de laboratoire (toutes les vérifications d'étalonnages éffectuées n'ont pas révélé de dérives à plus long terme) ne peut cependant être étendue à une réalisation industrielle en raison de propriétés mécaniques insuffisantes de ce revêtement.

L'accent est donc mis sur les propriétés recquises pour un éventuel matériau de revêtement.

Par la suite, les capteurs utilisés au champ (type D) présentaient des *électrodes nues en acier inoxydable* qui n'ont jamais présenté de traces d'oxydation après trois mois d'utilisation au champ, et nous ont donc donné toute satisfaction.

Cette voie paraît de loin préférable, parce que plus simple à mettre en oeuvre et moins problématique quand à l'utilisation des capteurs.

Cette solution demande cependant à être qualifiée à un terme plus important et dans des conditions plus agressives.

44 Effets de main, sensibilité à des défauts du courant d'alimentation secteur.

L'abandon du cuivre pour la réalisation du corps du capteur, pour les raisons évoquées au paragraphe 423, a eu pour conséquence annexe une sensibilité plus grande du capteur à son environnement. L'abscence de blindage du circuit sur le capteur D utilisé au champ se matérialise par une légère sensibilité du cable à son environnement. Cette situation, certes non redhibitoire, peut facilement trouver une solution dans le cadre du compromis suivant: tout en conservant un blindage au circuit, celui-ci pourait être protégé par une épaisseur de matériau isolant. Quitte à augmenter légèrement le diamètre du capteur, la couche d'isolant devra être suffisament importante pour supprimer l'effet d'étirement des lignes de champ matérialisé par l'extension des lignes d'isoinfluence le long du capteur A (FIG.7a).

De même, le capteur de type D utilisé au champ à manifesté des perturbations causées par une alimentation secteur défectueuse. Ces phénomènes, qui n'étaient pas apparus au laboratoire n'ont cependant pas affecté la qualité des résultats terrains. L'adoption d'une alimentation sur batterie 12 V a permis de faire disparaître ces perturbations.

5 FACTEURS D'INFLUENCE DE LA PERMITTIVITE DES SOLS, ETUDE EXPERIMENTALE AU LABORATOIRE.

51 Facteurs d'influence de la permittivité diélectrique des sols.

Parmi les facteurs d'influence de la permittivité diélectrique des sols, la proportion volumique de chacun de ses constituants intervient en premier lieu. Cependant, de nombreux autres phénomènes interviennent et rendent difficile la prévision de la teneur en eau des sols par la simple connaissance de leur permittivité. Parmi ces facteurs, nous avons recensé dans l'étude bibliographique le rôle de la température, de la salinité de la solution du sol, de la texture et la structure du sol. Les données relatées dans la bibliographie sont obtenues pour des fréquences et avec des dispositifs très divers.

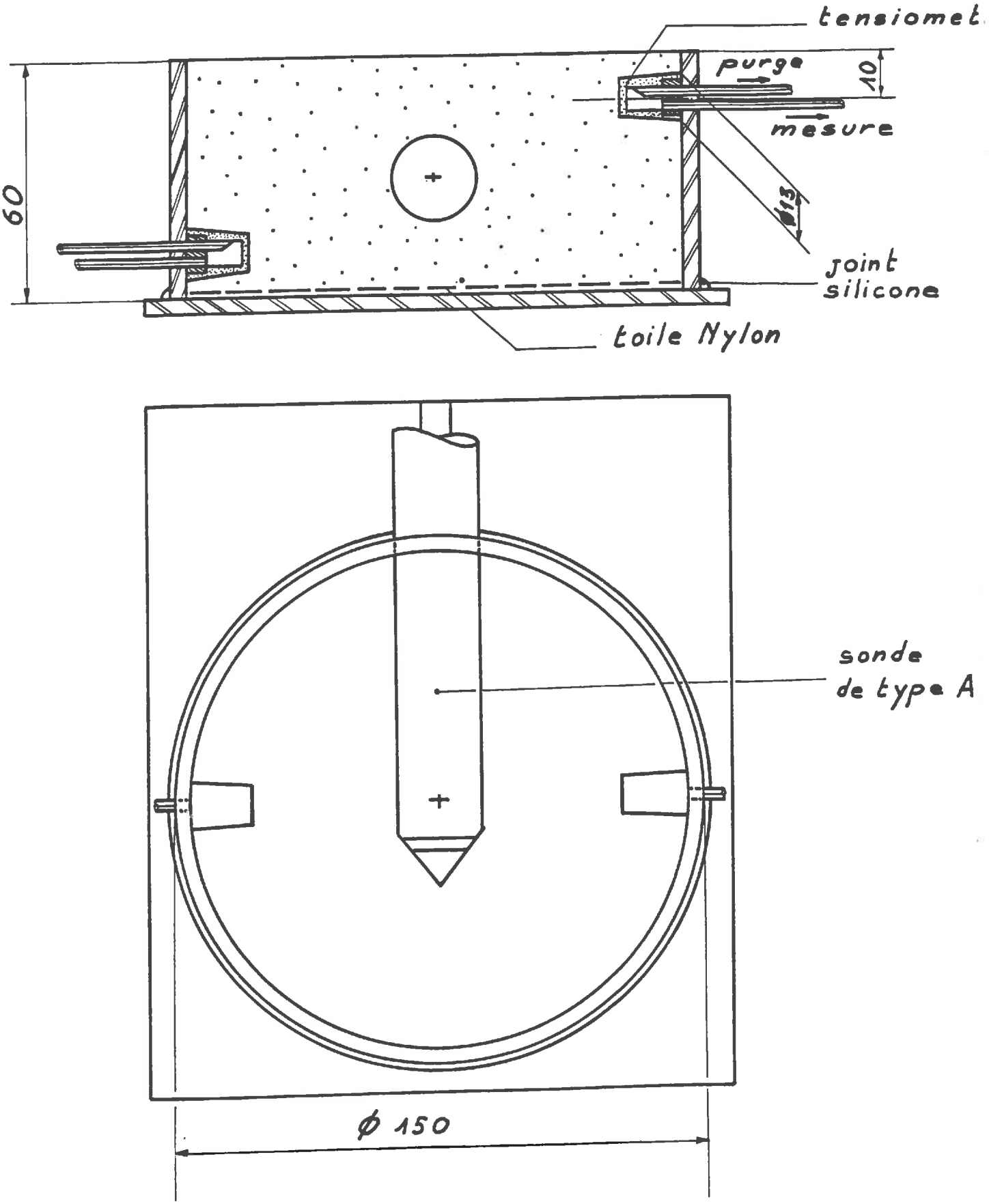


FIGURE 10: DISPOSITIF DE MESURES DE LABORATOIRE

Nous avons donc entrepris une étude expérimentale de l'influence de ces divers facteurs sur *la relation permittivité-teneur en eau des sols*. Les résultats sont obtenus pour une fréquence toujours proche de 38 MHz.

52 Conditions générales de l'étude expérimentale au laboratoire.

521 Protocole expérimental général.

Le protocole expérimental adopté au laboratoire a pour objet de dissocier l'effet de chacun des facteurs thermiques, texturaux, structuraux et chimiques sur la mesure. Aussi avons nous recherché la plus grande normalisation possible dans la préparation et la caractérisation des échantillons, les conditions générales d'obtention des résultats et leur expression .

5211 Dimensions des échantillons.

L'ensemble des résultats expérimentaux de laboratoire ont été obtenus avec une sonde de type A. L'étude de la résolution pour ce type de capteur nous a permis d'assimiler le volume pris en compte par la mesure à un cylindre de rayon de 3 à 4 cm et d'une hauteur de 15 cm. Les échantillons mesurés sont contenus dans un moule de diamètre 15 cm et de hauteur 6 cm (FIG.10). La sonde est disposée sur un axe perpendiculaire à l'axe du moule, à mi-hauteur. L'essentiel du volume de résolution de la sonde est donc a priori inscrit dans le moule. Cependant, l'ensemble du dispositif est noyé dans un volume d'extension, constitué de sol humide, de plus grandes dimensions (300 mm * 300 mm * 400 mm), pendant l'éxécution de la mesure, afin de préserver celle-ci de toute influence résiduelle du milieu extérieur.

5212 Critère d'homogénéité de la teneur en eau dans l'échantillon.

Pour l'ensemble des résultats obtenus sur des milieux dits "continus", une parfaite homogénéité de répartition de l'eau dans l'échantillon a été recherchée. Les variations de teneur en eau sont obtenues soit par évaporation à partir de la face supérieure du moule, soit par succion à partir de la face inférieure. Après l'obtention de la teneur en eau souhaitée, le moule est fermé et une phase de redistribution de l'eau dans l'échantillon est alors observée pour obtenir l'homogénéité recherchée. Un critère de fin de redistribution est obtenu à partir de données tensiometriques. Deux tensiometres sont disposés à 10 mm de chaque face du moule, dans une position diamétralement opposée. Les potentiels sont relevés dans toute la phase de redistribution de l'eau dans l'échantillon, et le critère d'homogénéité est obtenu à l'égalité des potentiels. La mesure de permittivité peut alors être réalisée. La décision peut être prise ainsi dans la gamme tensiométrique des potentiels. Au delà, des délais de redistribution pouvant atteindre 15 à 20 jours sont déterminés sur le critère de la stabilisation des mesures de permittivité au cours du temps.

5213 Préparation des échantillons.

Mise à part l'expérimentation visant à faire apparaître un effet structural, l'étude est réalisée sur des échantillons obtenus de la façon suivante:

- Pour les échantillons sableux, le remplissage du moule est effectué sous eau pour assurer un arrangement homogène des particules élémentaires et une masse volumique la moins variable possible dans le volume de mesure.
- Pour les échantillons limoneux et limono-argileux, la structure initiale du matériau est détruite par ajout progressif d'eau au sol et malaxage. Une pate d'une liquidité propice au remplissage du moule, mais sans excès d'eau est obtenue en utilisant une relation empirique reliant la teneur en eau d'apport à la nature texturale du sol utilisé (KHEYRABI et MONNIER, 1968). On recherche l'élimination des bulles d'air avant le remplissage du moule.

L'échantillon évolue donc d'un état initial saturé en eau vers l'état sec, proche de l'arrangement textural (sans autre porosité que celle résultant de l'arrangement des particules texturales élémentaires), en fin d'expérience.

5214 Mesure de la teneur en eau de référence de l'échantillon.

Pour des raisons d'ordre physique, d'une part, et pratique de l'autre, on choisit délibérément de corréler la permittivité diélectrique à la *teneur en eau volumique* du matériau considéré. C'est en effet une concentration volumique de molécules d'eau dans le diélectrique qui détermine sa permittivité. Ensuite, dans la perspective d'inversion de la relation permittivité-teneur en eau, on peut penser que les utilisateurs seront beaucoup plus intéressés par une expression des résultats en termes de teneur en eau volumique leur permettant de réaliser des bilans hydriques.

$$\text{Teneur en eau volumique} = \theta = \frac{\text{volume d'eau}}{\text{volume de sol}} = [m^3 * m^{-3}]$$

On a la relation :

$$\theta = W * \rho_d / \rho_w$$

avec:

$$W = \text{teneur en eau pondérale} = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse de sol sec}} = [kg * kg^{-1}]$$

$$\rho_d = \text{masse volumique sèche} = \frac{\text{masse de sol sec}}{\text{volume total}} = [kg * m^{-3}]$$

Pour établir chaque point expérimental, on mesure donc:
- la permittivité de l'échantillon,
- sa teneur en eau pondérale, obtenue par pesées,
- sa masse volumique.

De par leur nature texturale, certains échantillons de sols sont soumis à des phénomènes de retrait au fur et à mesure de la phase de dessication. Le retrait du sol est donc pris en compte pour le calcul de la masse volumique, au moyen de mesures des dimensions de l'échantillon.

5215 Conditions de température.

Les différents résultats de laboratoire, exception faite de ceux obtenus pour la recherche d'effets thermiques, ont été obtenus à une température de 25° C.

522 Recherche du rôle de la texture.

Le moule est rempli de sols de textures différentes selon les conditions standard. Quatre sols ont été expérimentés, leur composition texturale est donnée par le tableau ci-dessous.

Classe granulométrique	Sable de Flassan	Limon de Marçon	Sol de Poirson	Sable S 31
Argile	7,9 %	14,4 %	27.2 %	
Limon fin	3,4 %	31,0 %	41.7 %	
Limon grossier	2,5 %	41,2 %	20.0 %	
Sable fin	41,7 %	9,9 %	7.1 %	100%
Sable grossier	44,5 %	3,5 %	4.0 %	

523 Expérimentation sur le rôle de la température.

Un échantillon de sol de Poirson, préparé selon les conditions standard, est soumis à un dessèchement par paliers successifs dans une gamme de teneurs en eau allant de la saturation (θ = 0.536 $m^3 * m^{-3}$) jusqu'à 0,121 $m^3 * m^{-3}$. A chaque palier, après la phase de redistribution, l'ensemble du dispositif est soumis à un essai thermique en armoire climatique. Le domaine expérimental est étendu à toute la gamme de températures couramment rencontrée au champ:

$0° C < T < 45° C$

Le domaine des faibles températures n'a pas été exploré. On sait en effet que la permittivité de l'eau gelée est de l'ordre de 4; l'influence de la teneur en eau sur la permittivité du milieu est alors moindre. De ce fait, ce domaine expérimental ne présente pas un intérêt primordial dans un premier temps.

Chaque mesure est effectuée après un temps d'équilibre thermique de 8 h dans l'armoire. Le milieu d'extension est protégé de l'évaporation par un film en matière plastique, durant la phase de mise en équilibre thermique, afin d'éviter que des gradients de température ne s'établissent dans le dispositif.

524 Recherche de l'effet structural.

On compare les relations obtenues pour deux sols de texture identique (Limon de Marçon), mais préparés selon des modalités visant à différencier leurs structures. A la relation $\epsilon' = f(\theta)$ obtenue avec une structure continue proche de l'arrangement textural (§ 522), on confronte une relation expérimentale obtenue avec une structure agrégée. Dans ce dernier cas, on prépare des agrégats de sol soigneusement tamisés (2-3 mm et 4 mm) que l'on humecte par vaporisations successives jusqu'à obtention de la teneur en eau souhaitée. Pour chaque point de teneur en eau, les agrégats sont placés autour de la sonde dans le moule. Pendant le remplissage, une action de vibration légère est éxercée sur le moule pour favoriser l'arrangement des agrégats entre eux et autour de la sonde. Cependant, aucune action de compression n'a été exercée sur le massif d'agrégats: en premier lieu, nous souhaitions des conditions d'arrangement standardisés d'une mesure à l'autre et d'autre part nous recherchions a priori une situation très contrastée avec la référence structurale continue. Dans ce cas, la gamme d'humidité est limitée à des teneur en eau faibles ($0{,}01\ m^3*m^{-3} < \theta < 0{,}19\ m^3*m^{-3}$), tant la manipulation et l'arrangement d'agrégats très humides sont délicats.

525 Recherche de l'effet de la salinité.

5251 Essai sur échantillon de sol.

On compare à la relation $\epsilon' = f(\theta)$, obtenue en conditions expérimentales standard sur le Sable de Flassan (§ 5213 & 522), une relation obtenue dans des conditions qui ne diffèrent que par la composition saline de la solution de préparation. Il faut souligner à ce propos que cet essai s'est déroulé dans des conditions d'organisation du matériau dans le moule très voisines:

$\rho_{d(référence)} = 1820\ Kg*m^{-3}$

$\rho_{d(solution\ concentrée)} = 1840\ kg*m^{-3}$

Dans ce dernier cas, on souhaite maintenir une concentration approximativement constante en sel. Par conséquent, la dessication du sable est obtenue par succion: le moule est alors équipé d'une toile de Nylon en son fond pour retenir le matériau pendant les manutentions. La dessication est obtenue en plaçant le dispositif sur du sable sec de même nature.

Le tableau ci-dessous présente les compositions effectives en sel des deux solutions utilisées pour la saturation des échantillons.

ion	solution de référence (mg/l)	solution concentrée en Nitrate de Calcium (mg/l)
NO_3^-	8,2	6200
Cl^-	29,5	-
SO_4^-	96,0	-

5252 Essai sur solutions de concentrations variables.

Ce second essai vise plus spécifiquement à faire apparaître le rôle joué par la concentration en sel de la solution. La sonde, préalablement revêtue d'une couche de paraffine est plongée directement dans des solutions de Nitrate de Calcium de concentrations croissantes. Le revêtement de la sonde est destiné à faire chuter la permittivité vue par le capteur à un niveau mesurable. Le domaine exploré s'étend de l'eau distillée à une concentration décinormale.

53 Résultats.

531 Influence de la texture du sol.

Les relations expérimentales $\epsilon'(\theta)$ obtenues pour les différentes textures étudiées sont représentées sur le graphe de la figure 11.

En premier lieu, on observe que le modèle linéaire paraît assez adapté à l'ajustement des points expérimentaux (cf.tableau ci-dessous).

texture	coef. A_0	coef. A_1	r	erreur type d'estimation
Poirson	16,69	30,57	0,998	0,30
Marçon	6,58	61,33	0,999	0,32
Flassan	9,19	54,71	0,996	0,43
S 31	4,12	54,63	0,999	0,11

On note une assez grande disparité sur les ordonnées à l'origine qui semble indiquer l'existance d'un rôle important de la permittivité de la matrice solide. Seule la pente de la relation établie pour le sol de Poirson diverge franchement. Cette constatation irait dans le sens d'un rôle de l'argile, intervenant avec une très grande surface spécifique sur les phénomènes interfaciaux de mobilisation de l'eau.

532 Effet de la température sur la permittivité diélectrique du sol.

On observe un accroissement important de la permittivité en fonction de la température, quelque soit la teneur en eau de l'échantillon (FIG. 12). Il est à noter que les variations de permittivité enregistrées relèvent de phénomènes physiques réels et ne peuvent être imputées au fonctionnement du dispositif de mesure; les tests de stabilité thermique de l'électronique (§ 412) lèvent toute ambiguïté à cet égard. La figure 13 montre l'incidence de la température sur la relation $\epsilon' = f(\theta)$.

Le rôle de la température sur le sol humide est difficile à expliquer. En effet, les liquides à l'état libre voient leur permittivité décroître avec la température tandis que la permittivité des solides ont un sens de variation inverse. Cette variation de permittivité du mélange sous l'effet de la température, constatée par HOEKSTRA (1974), pourrait être expliquée par les propriétés diélectriques particulières de l'eau du sol qui n'est pas à l'état libre.

Pour une teneur en eau donnée, la relation $\epsilon' = f(T)$ est linéaire. Le tableau ci-dessous présente les pentes ($d\epsilon'/dT$) observées pour les différentes teneurs en eau de l'échantillon.

FIG.11: INFLUENCE DE LA TEXTURE SUR LA RELATION PERMITTIVITE-TENEUR EN EAU

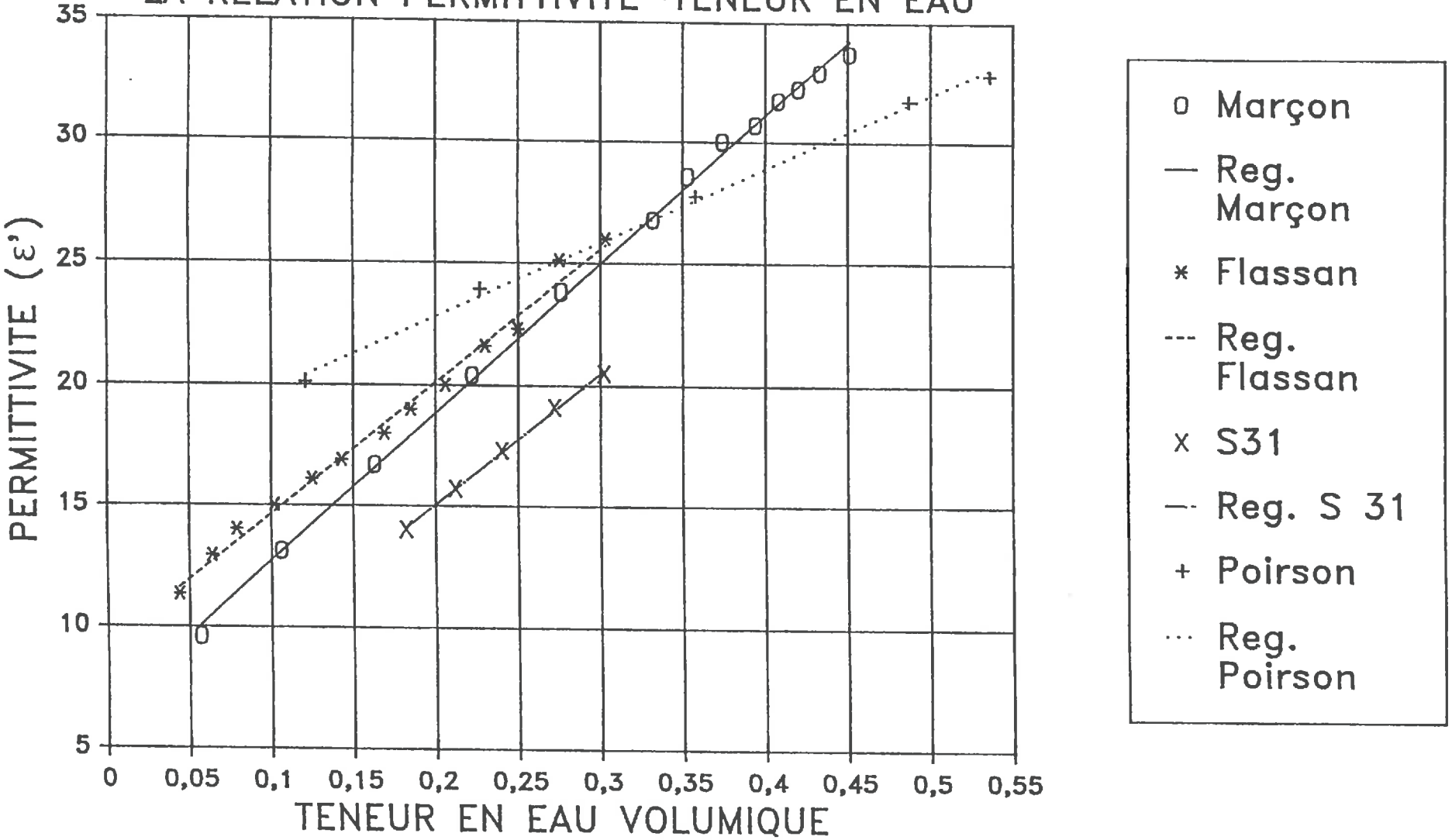


FIG.12: INFLUENCE DE LA TEMPERATURE
SUR LA PERMITTIVITE
POUR DIFFERENTES TENEURS EN EAU

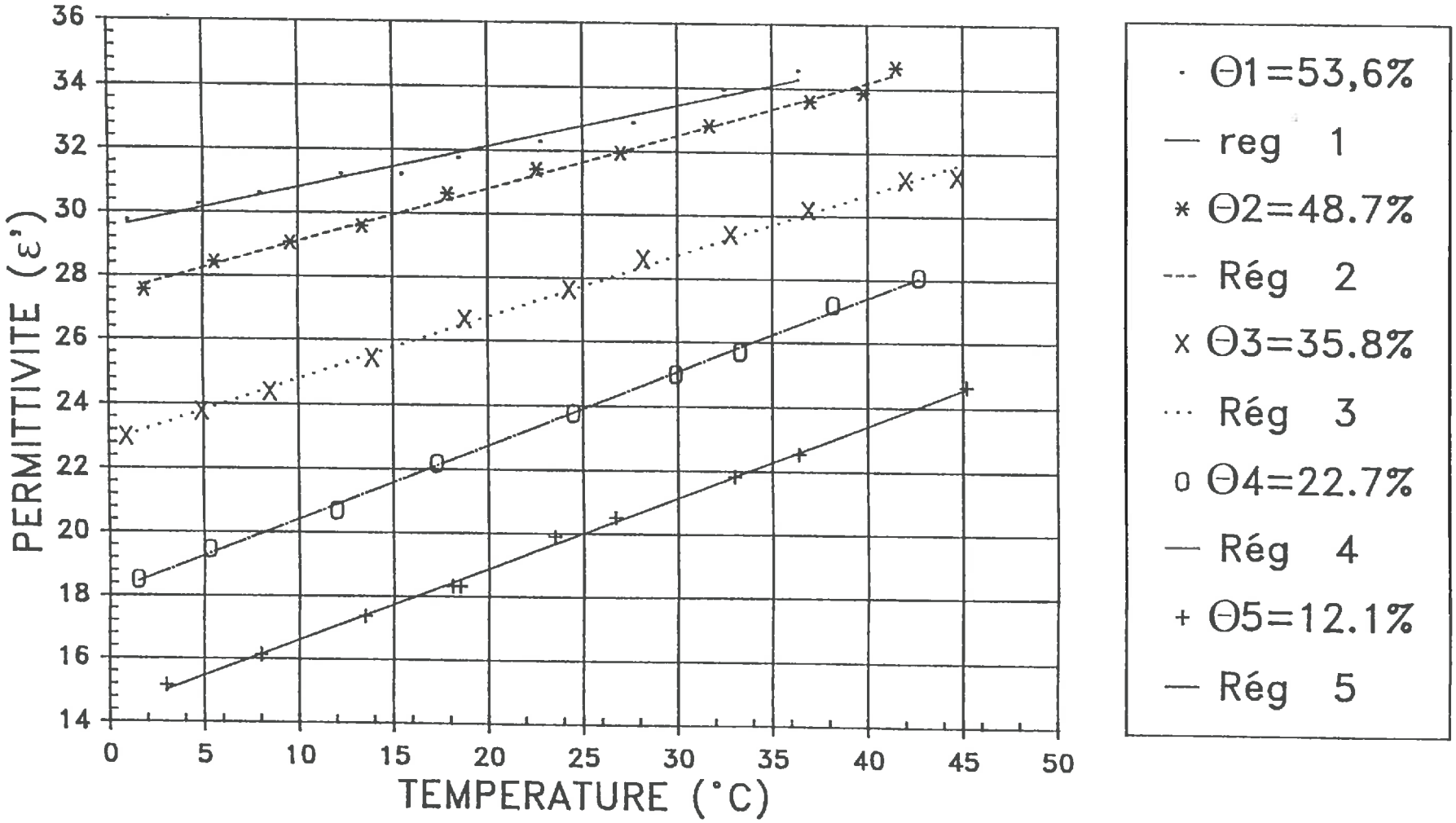
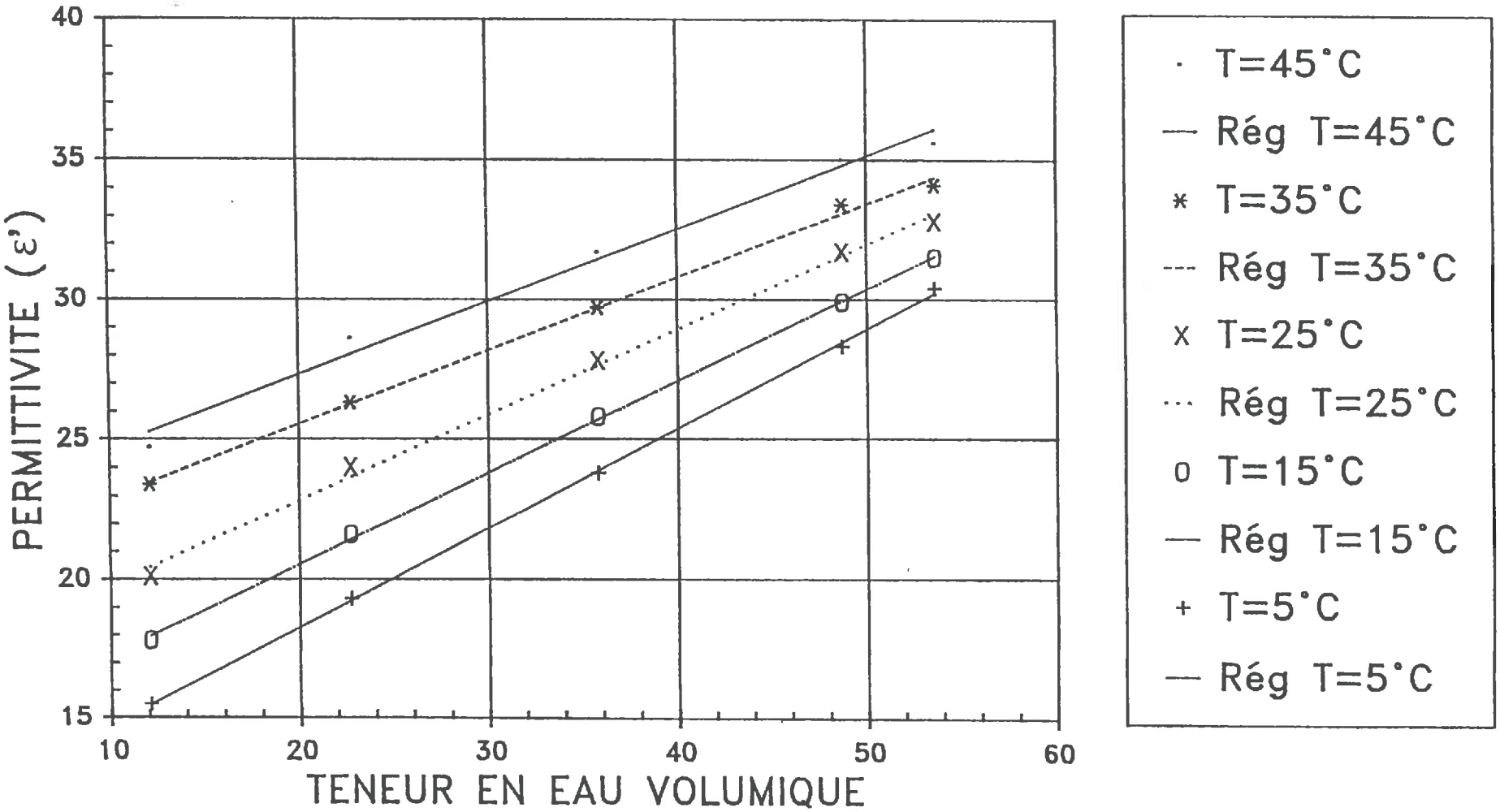


FIG.13: INFLUENCE DE LA TEMPERATURE
SUR LA RELATION ε' = f(Θ)



θ ($m^3 * m^{-3}$)	Valeur du coefficient A_1 (de/dT)	Erreur type sur le coefficient A_1
0,536	0,132	0,005
0,487	0,170	0,003
0,358	0,197	0,004
0,227	0,233	0,003
0,121	0,228	0,004

La sensibilité de la permittivité à la température semble significativement décroître avec la teneur en eau de l'échantillon, en particulier dans le domaine des très fortes teneurs en eau.

Dans la pratique, on pourra adopter un coefficient correcteur moyen (0,22 ϵ'/°C) sans grand risque d'erreur dans la plupart des cas, sauf pour les situations très proches de la saturation.

En toute rigueur, la correction utilisée ne vaut que pour la texture et l'état structural étudiés. Compte tenu de la linéarité observée pour les relations permittivité-température, le protocole pourra être considérablement allégé si l'on souhaite étendre l'étude à d'autres textures.

533 Influence de la structure du sol.

Les états structuraux obtenus se situent aux extrêmités de la gamme de variation possible:

Etat structural continu: $1440\ Kg/m^3 < \rho_d < 1600\ Kg/m^3$

La variation de masse volumique correspond dans ce cas à un retrait du sol au fur et à mesure de sa dessication.

Etat structural agrégé : $1060\ Kg/m^3 < \rho_d < 1140\ Kg/m^3$

On observe un modification considérable de la relation permittivité teneur en eau consécutive à la variation de l'état structural (FIG. 14). Les régressions obtenues sont données dans le tableau ci dessous.

Structure	Coef.A_0	Coef.A_1	r
continue	6,58	61,33	0,9993
2 - 3 mm	2,80	30,02	0,9714
4 mm	2,80	27,43	0,9585

FIG. 14: ROLE DE LA STRUCTURE
SUR LA RELATION ε' = f (Θ)

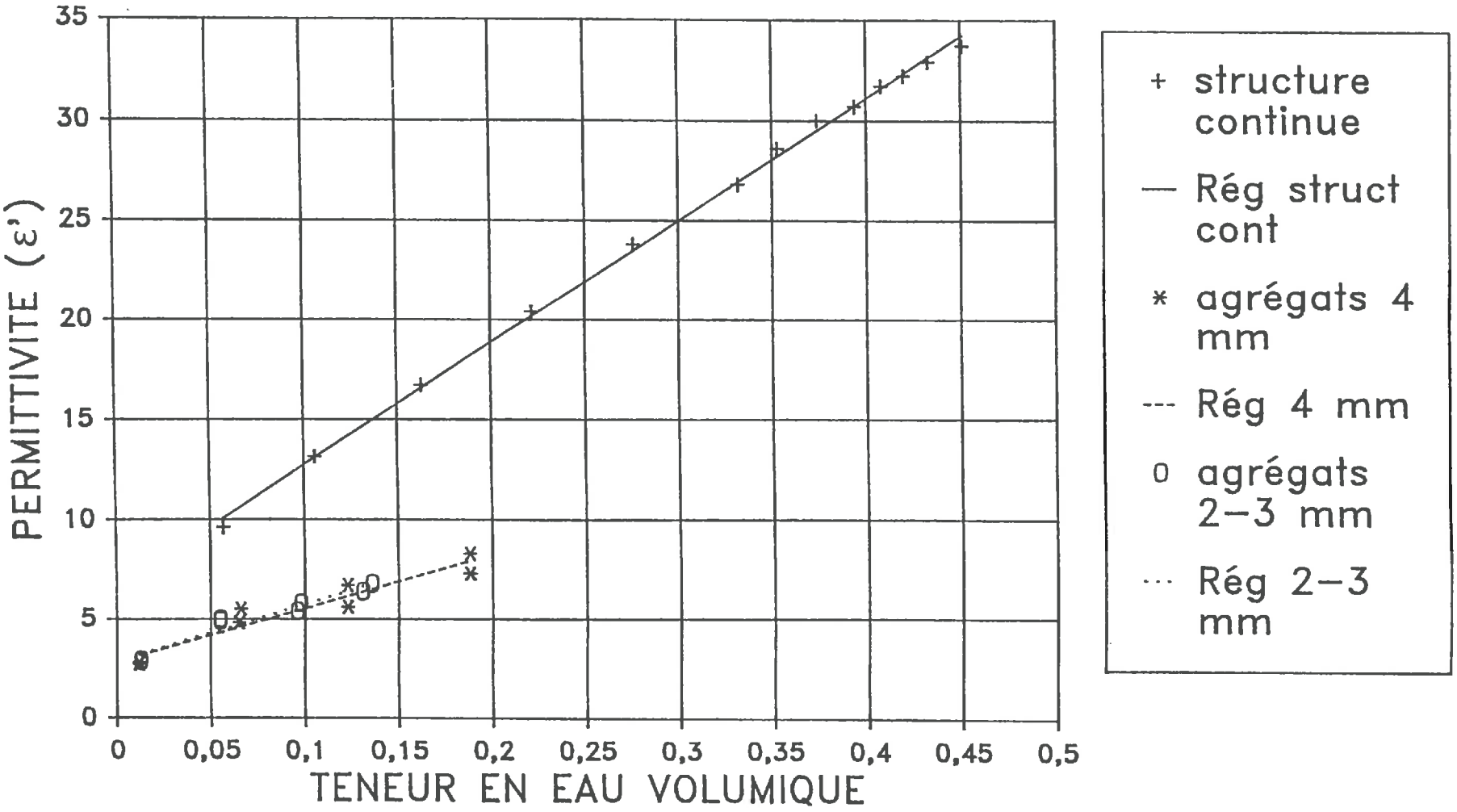


FIG. 16: EFFET DE LA CONCENTRATION SUR LA PERMITTIVITE DE LA SOLUTION

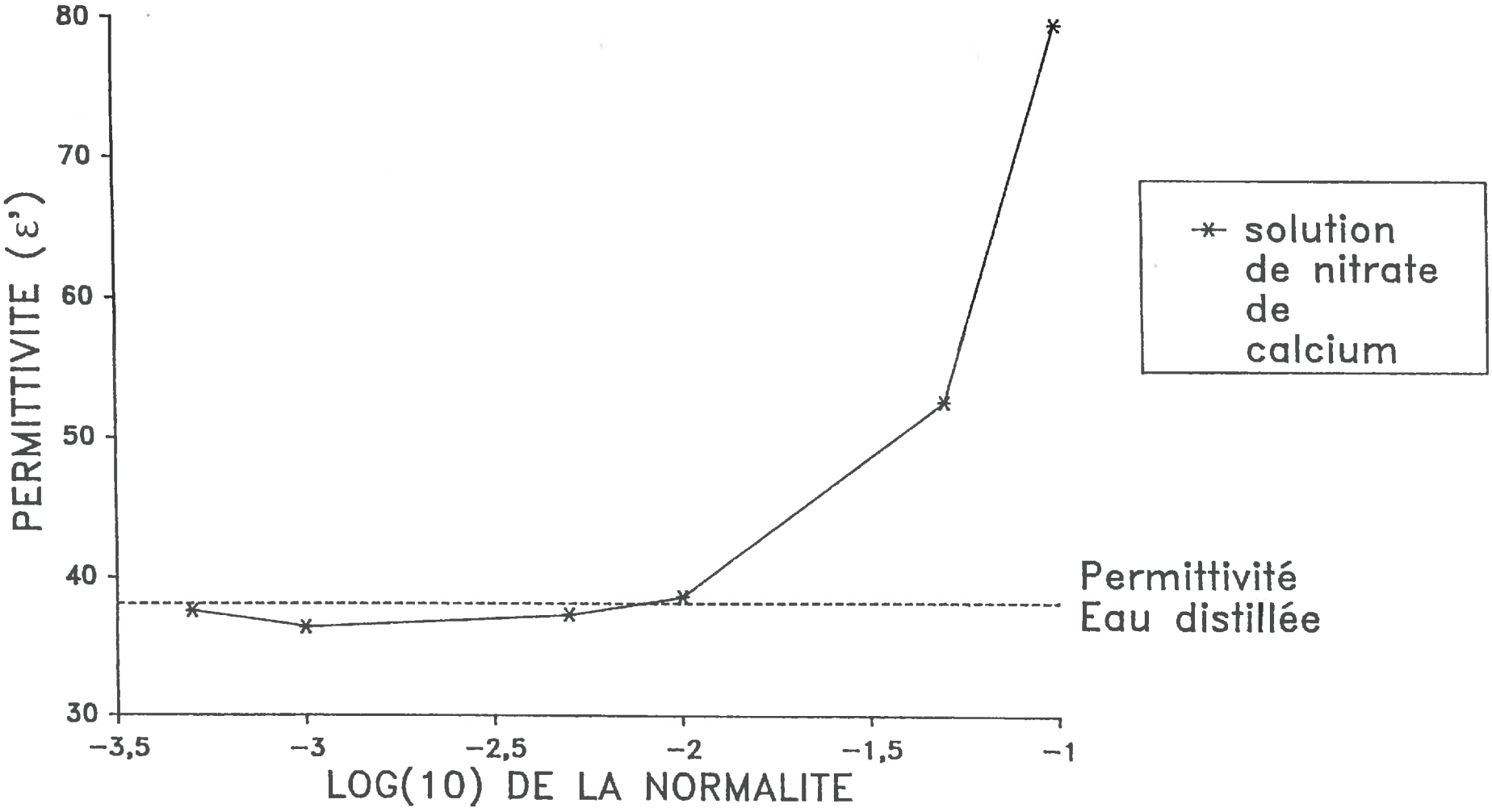
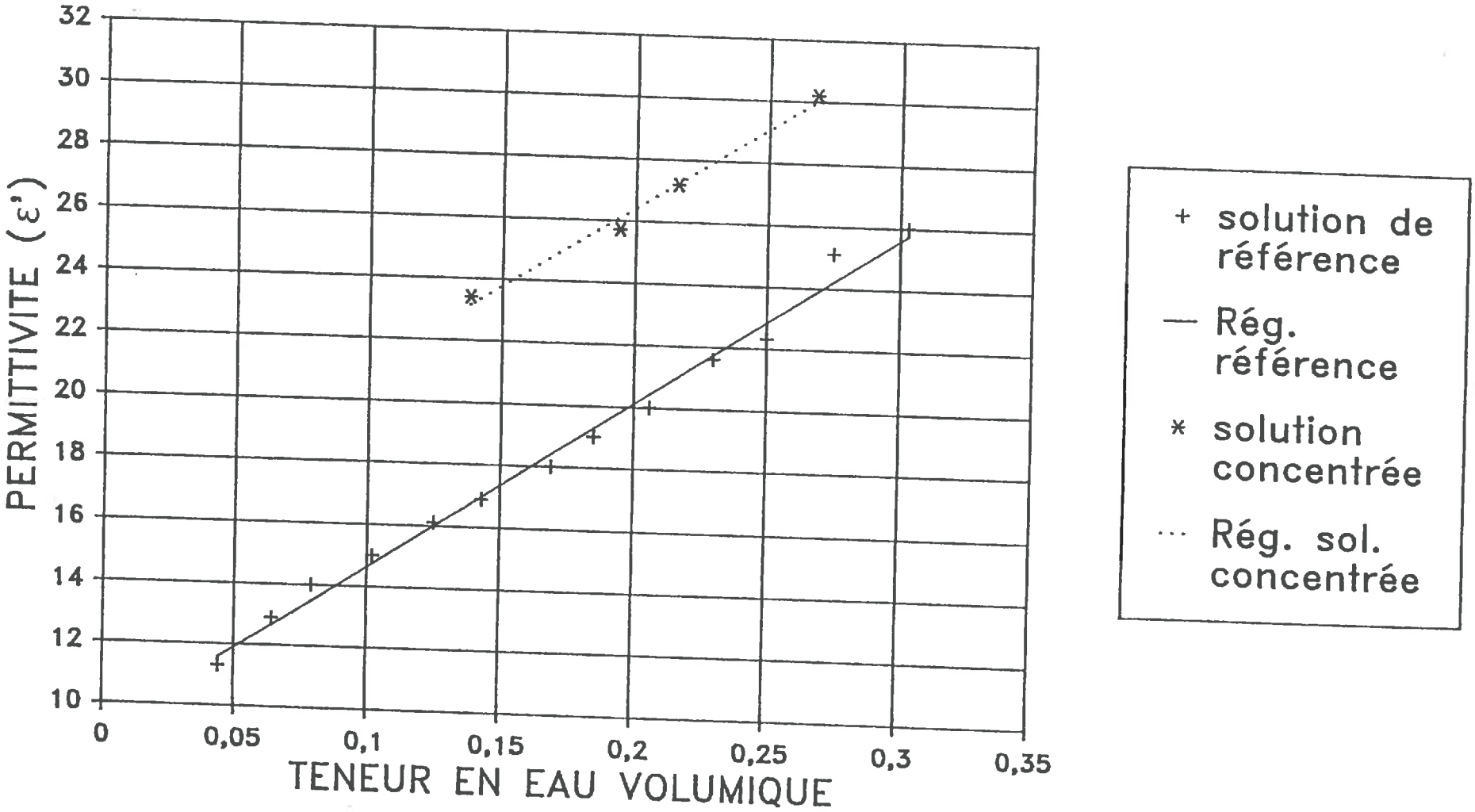


FIG. 15: EFFET DE LA SALINITE DE LA SOLUTION DU SOL SUR LA RELATION $\varepsilon'=f(\Theta)$



La diminution d'ordonnée à l'origine, pour les états structuraux agrégés, rend compte d'une modification de permittivité de la matrice solide, consécutive à l'augmentation en proportion volumique de la phase gazeuse. La porosité de l'échantillon passe en effet de 0,396 m^3/m^3 pour l'état continu à une valeur de 0,585 m^3/m^3 pour l'état agrégé. Cependant, compte tenu du mode de remplissage des agrégats, on doit considérer que la porosité est plus importante dans le voisinage immédiat de la sonde (sur la première couche d'agrégats). Le contact aurait sans doute été meilleur si la sonde avait été implantée dans un trou foré dans le massif d'agrégats. Ce constat n'engage pas la conclusion essentielle relative au rôle de la structure sur la permittivité de la matrice solide, mais incite à la prudence dans l'interprétation de la diminution de la pente de la relation $\epsilon' = f(\theta)$ par rapport à la référence structurale continue.

Par ailleurs, l'intervention sur la taille des agrégats n'a pas été suffisante pour faire apparaitre des différences significatives entre les relations "2-3 mm" et "4 mm".

534 Influence de la composition de la solution du sol.

La solution utilisée pour saturer l'échantillon de sable de Flassan a permis de mettre en évidence un effet de la salinité sur la relation permittivité-teneur en eau (FIG. 15). Cependant, il est à considérer qu'on est en présence d'une solution très fortement concentrée en Nitrate de Calcium (N/10). Par ailleurs, il semble que l'on ne soit pas parvenu à conserver une concentration constante. Si tel avait été le cas, une convergence sur la même ordonnée à l'origine des deux droites aurait dû être observée.

L'expérience relative au rôle de la concentration en sel sur la permittivité de la solution (FIG. 16) met en évidence un seuil en deçà duquel la permittivité observée est égale à celle de l'eau distillée (mesurée dans des conditions équivalentes). Par ailleurs, la conductance mesurée (4,8 mS) pour le point expérimental situé au delà du seuil ($LOG_{10} N = -1,3$) est à la limite de la conductance acceptée par le dispositif de réjection (5 mS). L'existence de ce seuil tend à démontrer l'efficacité du dispositif de réjection de la composante conductive de la permittivité.

Il est probable qu'intervienne dans le sol une concentration volumique en ions. Sous cette hypothèse, le seuil de normalité acceptable pour la solution serait reporté à un niveau plus important. Une vérification expérimentale de cette hypothèse est envisageable, mais demande un temps d'expérimentation relativement important.

54 Conclusion partielle de l'expérimentation au laboratoire; hiérarchisation des facteurs et conclusions sur le mode d'étalonnage à adopter.

En premier lieu, il convient d'évaluer *les qualités du capteur réalisé*, notamment en regard des exigences requises par sa vocation à être mis en oeuvre sur le terrain.

- Le capteur fournit une mesure précise de la permittivité diélectrique du sol: les résultats obtenus (§ 531: effet de la texture) font apparaitre des erreurs type d'estimation de l'ordre de 0,3 points de permittivité.
- Le circuit électronique réalisé est très peu sensible à la température.
- La stabilité de la réponse du capteur est vérifiée pour ce qui concerne les temps d'utilisation des essais au laboratoire et au champ.
- La réjection de la composante immaginaire de la permittivité est effective dans les limites signalées. A titre d'ordre de grandeur les conductances observées sur les essais de terrain sont de l'ordre de 2 à 3 mS, elles atteignent rarement 4 mS en conditions très humides (essai POIRSON).
- Enfin, la résolution géométrique obtenue permet d'envisager l'étude de nombreux phénomènes qui se déroulent à une très faible échelle spatiale tout en permettant une implantation simple et peu perturbatrice des capteurs.

Deux remarques préalables s'imposent avant de tirer les conclusions de l'*étude des facteurs physiques et chimiques* qui déterminent la permittivité.

-En premier lieu la permittivité est une grandeur physique *très sensible* à la teneur en eau. Cette remarque d'évidence souligne *le très grand intérêt de la méthode de mesure* elle même. Peu de phénomènes physiques simples peuvent être reliés à des variations de teneur en eau. Comme pour d'autres méthodes indirectes des facteurs parasites compliquent son utilisation.

-En second lieu, le besoin de clarté dans l'interprétation des résultats nous a quelquefois conduit à explorer des états du sol aux bornes de leurs domaines de variation. Il est clair que de telles situations extrêmes ne seront que rarement rencontrées dans les condition concrètes du terrain. La relation permittivité-teneur en eau n'y subira pas des variations d'une telle étendue.

La susceptibilité de la permittivité aux facteurs parasites évoqués interdit toutefois d'envisager l'utilisation d'une relation d'étalonnage unique valable en toutes circonstances.

Un étalonnage au champ plus robuste s'impose si l'on refuse de s'exposer à un biais sur l'estimation de la teneur en eau.

Dès lors, un certain nombre de facteurs qui ne subissent pas de variations temporelles seront pris en compte dans cet étalonnage "terrain". Ceci vaut en particulier pour la composition texturale du sol.Cette remarque est également valable dans une certaine mesure pour la structure du sol et la salinité de sa solution.

Sous réserve d'inventaire, la réjection de l'effet de la conductivité permet d'opérer dans un très large domaine de situations concrètes.

Quand à la structure du sol, elle évolue le plus souvent à l'échelle saisonnière au gré des épisodes climatiques et, bien entendu sous l'effet des actions humaines. Sa cinétique de variation est souvent très lente, sauf en ce qui concerne les premiers centimètres de sol sous la surface. Un réajustement de l'étalonnage peut alors être envisagé à une périodicité adaptée.

Le cas de la température est différent. Le sol subit des variations thermiques de périodes annuelle et journalière. Les amplitudes constatées sont souvent telles que leur effet sur la permittivité devra être pris en compte, au moins pour certaines applications de la méthode.

6 EXPERIMENTATION AU CHAMP.

61 Objectifs de l'expérimentation au champ.

Arrivé à ce point de l'étude expérimentale, il convient de prendre la mesure des problèmes concrets posés par la mise en oeuvre au champ de tels capteurs. Le mode d'étalonnage, en particulier, doit certes rester à la discrétion des utilisateurs qui l'adapteront à leurs objectifs, mais il doit se référer à des acquis expérimentaux qui permettent de l'orienter.

Une évaluation plus globale de cette méthode est recherchée dans l'expérimentation *in situ*. L'évaluation concerne la vérification des performances attendues dans différents domaines suivants:

- la faisabilité de la mise en oeuvre,
- la précision de la relation expérimentale obtenue au champ,
- la qualité des observations en liaison avec la diminution du volume de mesure par rapport aux méthodes existantes,
- la qualité des observations en rapport avec l'échantillonnage temporel.

62 Présentation des dispositifs expérimentaux.

621 Expérimentation sur le site de POIRSON.

Une première expérience de terrain concernant le site de POIRSON (Montfavet, département de Vaucluse) s'est déroulée du 29 Mai au 9 Juin 1988.

La *texture* de ce sol est présentée au § 522.

La parcelle d'essai est subdivisée en deux sous-parcelles de 40 m * 10 m différenciées par leurs *états structuraux*. Un premier état résulte d'un travail superficiel datant de l'année précédente, rappuyé par les actions climatiques durant huit mois. Un deuxième état résulte d'une préparation à la rotobèche et à la houe rotative antérieure de quelques jours (24 & 25 Mai 1988) au déroulement des mesures. Le travail à affecté le sol sur une profondeur de 15 cm.

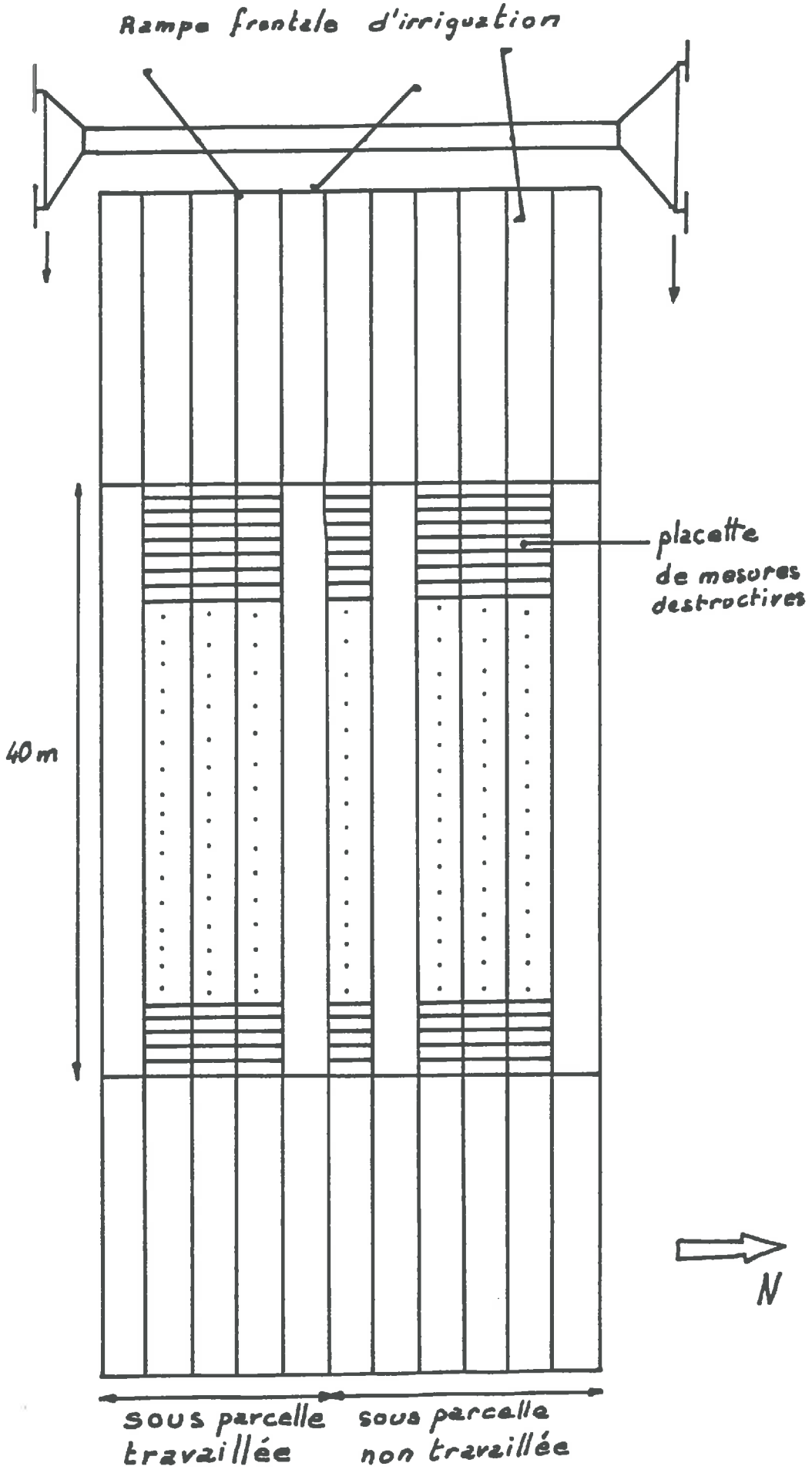


FIGURE 17: DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE POIRSON

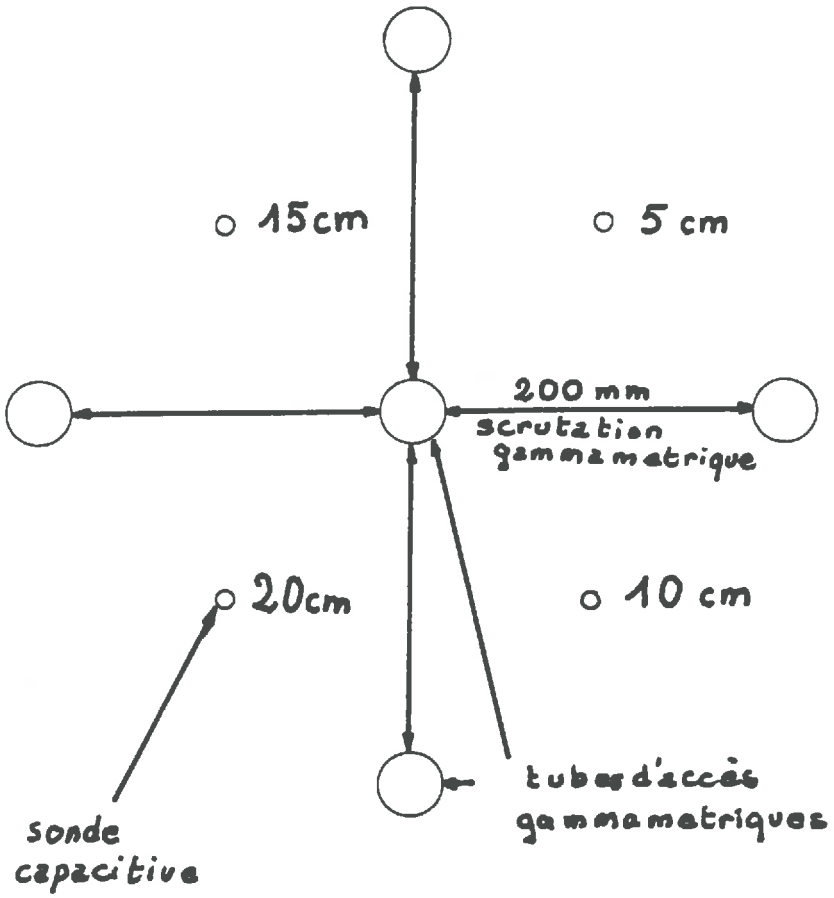
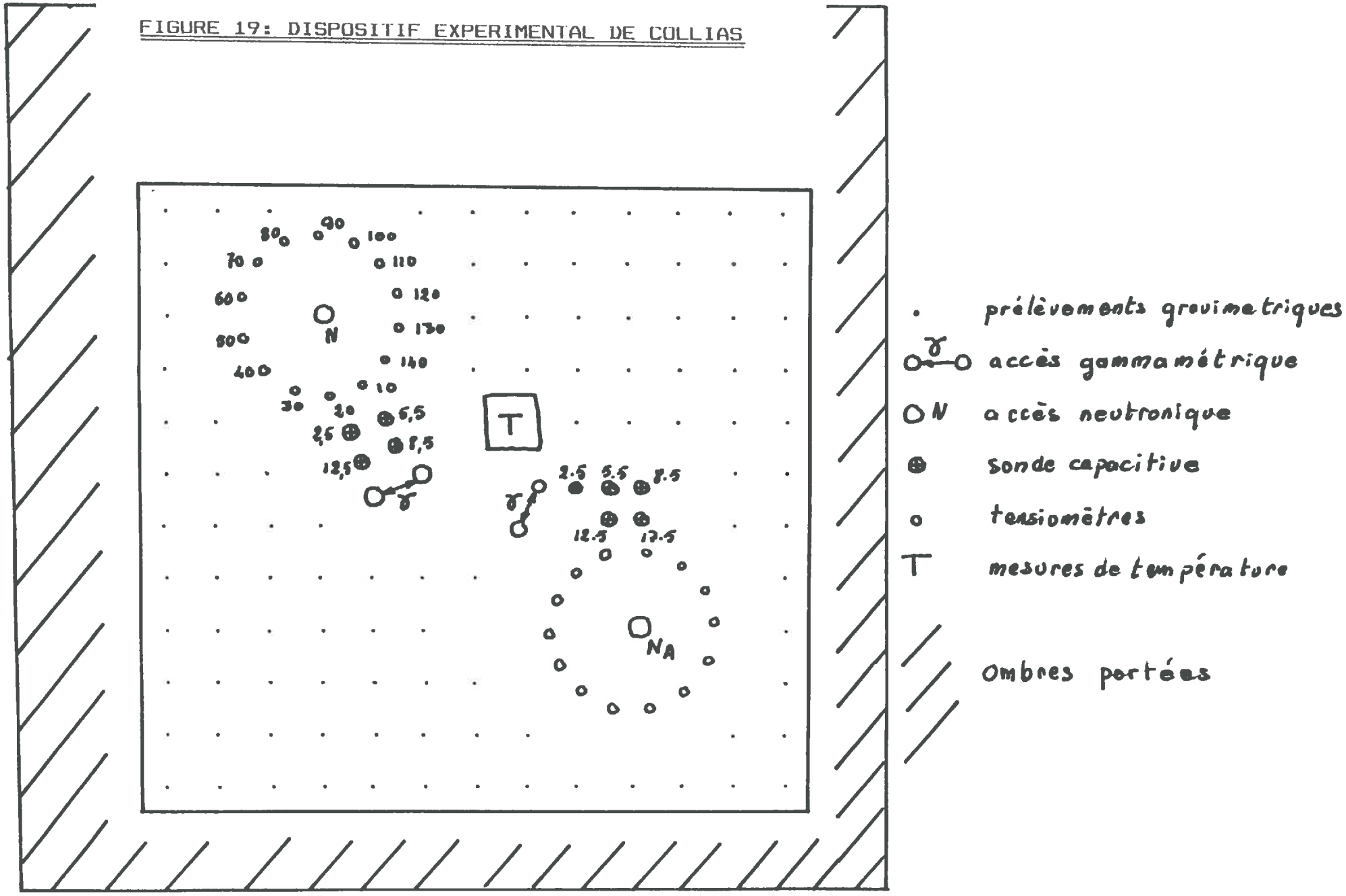


FIGURE 18: DISPOSITION DES SONDES CAPACITIVES ET DES TUBES D'ACCES GAMMA-DENSIMETRIQUE. ESSAI POIRSON

FIGURE 19: DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE COLLIAS



Chaque sous-parcelle est subdivisée en bandes de travail, matérialisées par le passage des engins agricoles, elles mêmes subdivisées en placettes. Certaines placettes correspondant à des situations topographiques de cuvettes ont été éliminées dans l'état structural rappuyé. Après élimination des placettes atypiques, *100 placettes de 1,5 m * 0,8 m* sont restées disponibles dans chaque sous-parcelles pour des observations destructives.(FIG.17)

Dans chacune des sous-parcelles sont installés *4 capteurs capacitifs*. Leur implantation (29 Mai) est effectuée après un premier arrosage (26 Mai) destiné à amener le sol dans un état mécanique meuble, favorable à la réalisation des avant trous à la tarière. Ils sont disposés verticalement, le barycentre de leur volume de mesure est placé aux cotes suivantes: Z = - 5 cm, -10 cm, -15 cm, -20 cm.

Les mesures de permittivité sont corrélées à des *teneurs en eau volumiques* calculées à partir de mesures de teneurs en eau pondérales et de mesures de masse volumiques. Les *mesures de teneurs en eau pondérales* sont réalisées sur des miroprofils: un trou de 25 cm de profondeur est creusé dans le sol; à partir d'une face verticale du trou, on enfonce une spatule permettant de découper des tranches horizontale de sol dont la cote moyenne est centrée sur la cote des capteurs. On dose alors la teneur en eau par la méthode classique gravimétrique. Les mesures de *masse volumique* sont réalisées à l'aide d'un gamma-densimètre de terrain (Gamma-densimètre L.P.C.-I.N.R.A.: STENGEL et Al, 1984 - BERTUZZI et Al, 1986) permettant des mesures sur des couches de sol de l'ordre de 4 à 5 cm d'épaisseur, centrées sur les cotes des capteurs capacitifs. Le site de mesures gamma-densimétrique est installé au même lieu que les sondes capacitives selon la FIG. 18. La valeur retenue pour chaque cote est la moyenne de 4 mesures effectuées en même temps que l'implantation des capteurs capacitifs.

Des mesures de *température* sont réalisées à l'aide de sondes platine disposées aux cotes des sondes capacitives. Les données thermiques sont enregistrées sur une acquisition automatique de données de type SAM 60 A.O.I.P..

Le sol part d'un *état initial très humide* en début d'expérience. Cet état initial est obtenu par plusieurs passages d'une rampe frontale d'irriguation d'une longueur de 20 m permettant d'arroser simultanément les deux sous-parcelles.

Les mesures débutent le 30 Mai à 16 h et se terminent le 9 juin. Trois cycles journaliers de mesures (8h-13h-19h)sont réalisés. Chaque point expérimental est basé sur la moyenne de 3 répétitions de mesures d'humidité pondérale, effectuées sur des placettes tirées au hazard, et 1 mesure de permittivité dans chaque sous-parcelles.

Le *climat* durant l'essai a été caractérisé par un beau temps ensoleillé général, avec un épisode nuageux le 31 Mai, une journée nuageuse avec pluie de 10 mm le 4 Juin et quelques passages nuageux les 5, 6, et 7 Juin

622 Expérimentation "COLLIAS".

L'essai "COLLIAS" se déroule du 9 au 29 Septembre 1988 sur une cuve expérimentale située à Montfavet. La cuve est remplie d'un loess provenant de Collias (Gard).

La cuve de petites dimensions (L = 3,4 m, l = 3,4 m, H = 2 m), a été remplie sous eau par du sol de Collias. Le remplissage, réalisé depuis 10 ans est réputé pour son homogénéité. Des bandes de garde ont été ménagées sur les côtés de la cuve pour éviter de prendre en compte des zones perturbées par des ombres portées dues à la surélèvation de 0,15 m des murs de délimitation par rapport au niveau du sol.

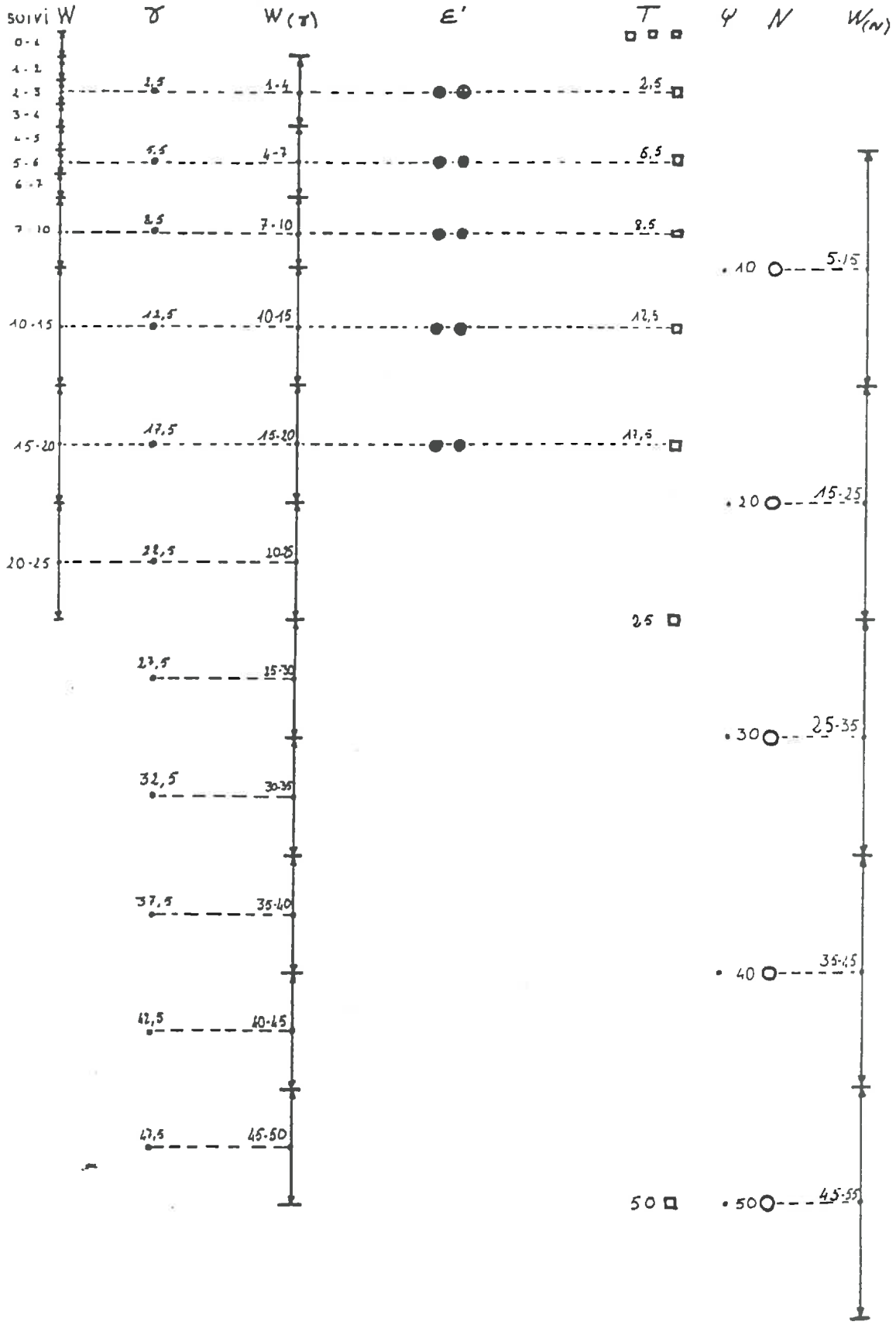


FIGURE 20: COTES DES MESURES ET PRELEVEMENTS, ESSAI POIRSON

La *texture* du sol est essentiellement constituée par un limon fin, avec un peu de sable. Ce sol présente la particularité de contenir un grand nombre de concressions calcaires de tailles comprises entre 1 cm et 10 cm. Le sol n'a pas été travaillé avant essai et présente une *structure* relativement compacte (1400 $Kg/m^3 < \rho_d < 1450$ Kg/m^3), issue de nombreuses années de repos sans travail. Seuls un raclage, destiné à éliminer des formations de mousses en surface, et un nivellement ont été réalisés préalablement à l'expérience.

Compte tenu de la dimension de la parcelle, chaque *placette d'observation* destructive mesure 0,10 m * 0,10m. Le mode de prélèvement des échantillons de dosage d'humidité pondérale adopté sur le dispositif de Poirson ne peut être envisagé ici. Les sol est donc prélevé à l'aide d'une petite tarière spécialement réalisée. Après chaque prélèvement, on place un tube P.V.C. dans le trou subsistant (ø = 20 mm) afin de prévenir toute perturbation sur les placettes environnantes.

Deux sites de mesures non destructives sont installés sur cette parcelle. Chaque site comprend deux tubes d'accès gamma-densimetriques, un tube d'accès neutronique, une série de capteurs capacitifs, et une série de tensiomètres. Un seul site de sondes platines a été installé pour toute la parcelle. La localisation sur un plan horizontal des capteurs est présentée FIG. 19 et les cotes verticales des mesures sont relatées sur la FIG. 20.

Cet essai diffère par ailleurs du précédent sur par son mode d'initialisation. Ici, *l'irriguation initiale* de la parcelle est réalisée par submersion. Quatre vingt millimètres d'eau ont été ainsi apportés, sous une charge de 40 mm. Des relevés des capteurs capacitifs sont effectués à fréquence élevée durant toute la période de mise en eau. Par la suite, l'*échantillonnage spatio-temporel* comporte deux séries de mesures journalières: le matin à 7 h et en début d'après midi à 14 h. Chaque point expérimental comporte 1 mesure capacitive et la moyenne de 5 humidités pondérales le matin, et 1 mesure capacitive pour 3 humidités pondérales l'après midi.

Compte tenu du mode de mise en eau par submersion, une collerette de paraffine est coulée autour des capteur et des tubes verticaux, à la surface du sol. Cette pratique est destinée à interdire à l'eau en charge d'emprunter d'éventuels chemins préférentiels le long des capteurs.

Enfin, cette période à été marquée par un beau temps chaud et ensoleillé, à l'exception d'un jour de pluie à la fin de l'expérience.

63 Résultats.

Nous ne présentons ici que les résultats les plus significatifs des deux expériences, qui permettront d'aprécier l'apport de la méthode. L'exploitation des jeux de données collectés est encore incomplète, en particulier pour la manipulation "Collias" qui devrait permettre par la suite d'estimer l'amélioration du bilan hydrique qu'on peut attendre de l'emploi de ces capteurs.

631 Conséquences des propriétés locales de la mesure.

6311 Evolution temporelle de la permittivité.

Paradoxalement en apparence, c'est au travers d'évolutions temporelles des teneurs en eau et des permittivités que nous pouvons aprécier les conséquences du caractère très local des mesures. En effet, les couches les plus proches de la surface du sol sont affectées par des phénomènes de courte périodicité. Ces phénomènes qui se déroulent à des échelles spatiales centimétriques, ne peuvent être mis en évidence si les couches de sols concernées sont 'noyées' dans des volumes de mesures qui intègrent des couches de sol d'une épaisseur d'ordre décimétrique.

Une remarque s'impose en préalable à la présentation des résultats. Les données exprimées en termes de teneurs en eau mesurées sont relatives à l'ensemble de la surface de la parcelle concernée, tandis que les mesures de permittivités sont relatives à un site particulier pris dans cette parcelle.

FIG. 21: HUMIDITE PONDERALE MOYENNE
EN FONCTION DU TEMPS

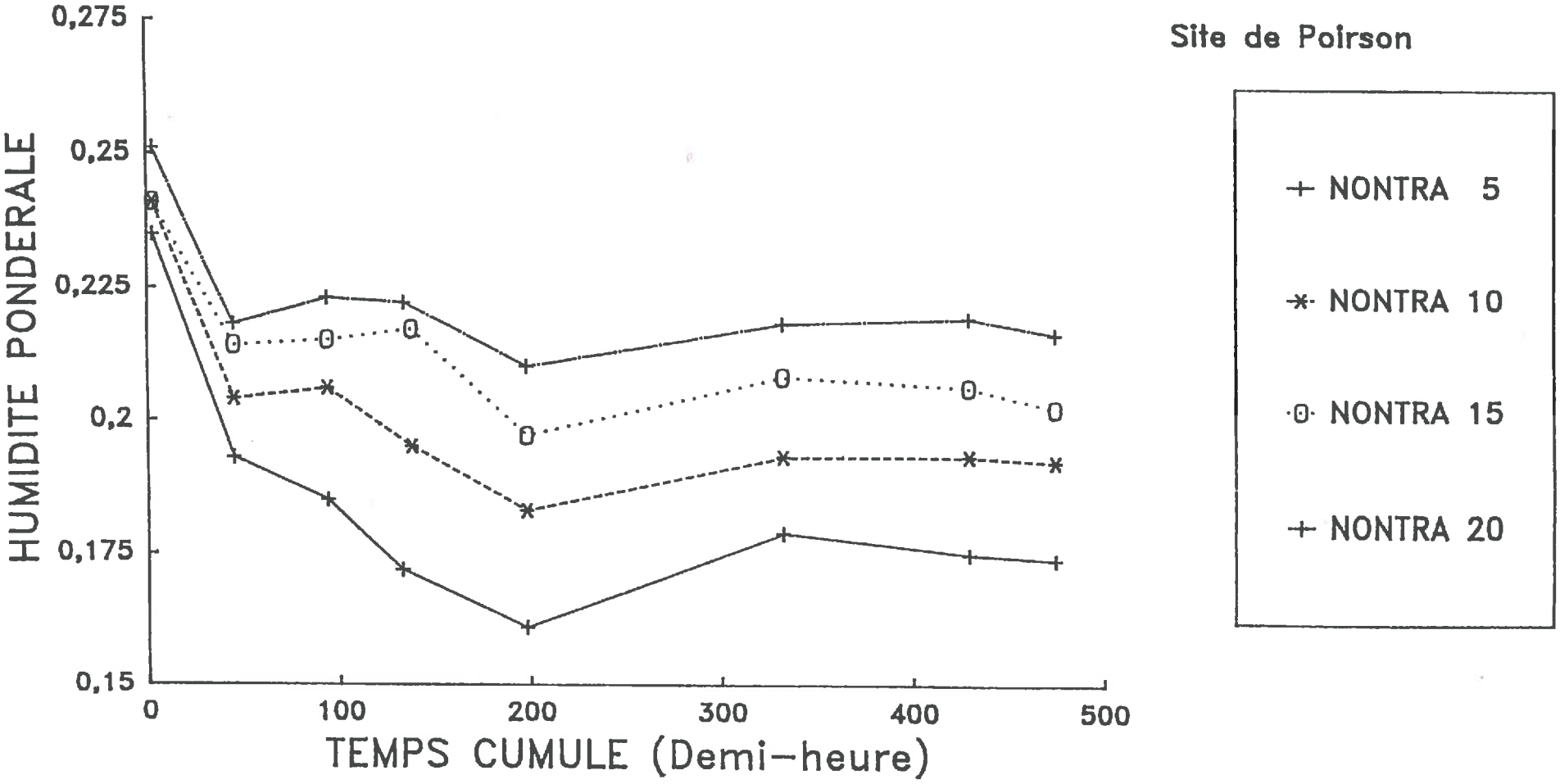


FIG. 22: PERMITTIVITE MESUREE
EN FONCTION DU TEMPS

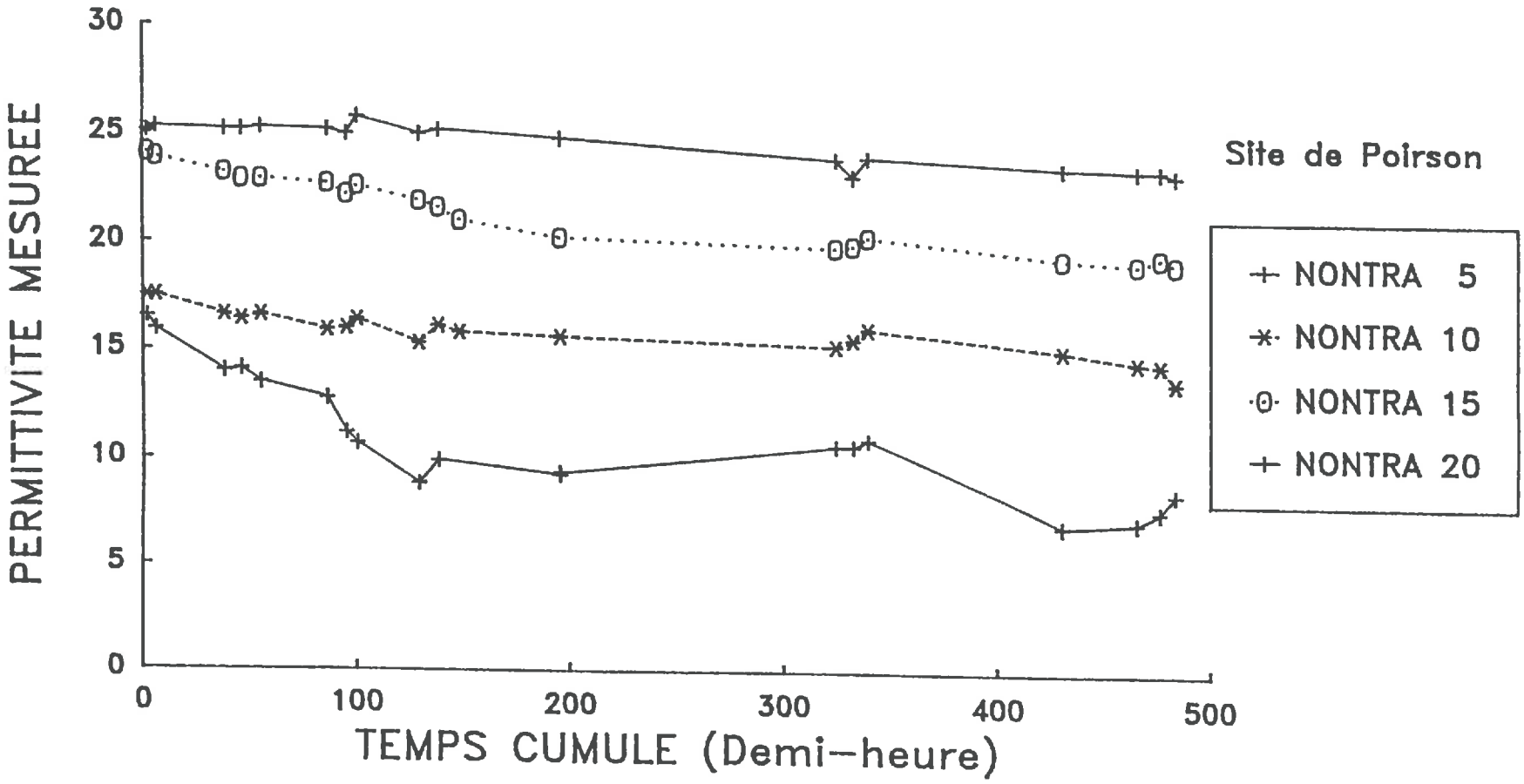


FIG. 23: PERMITTIVITE NORMALISEE
EN FONCTION DU TEMPS

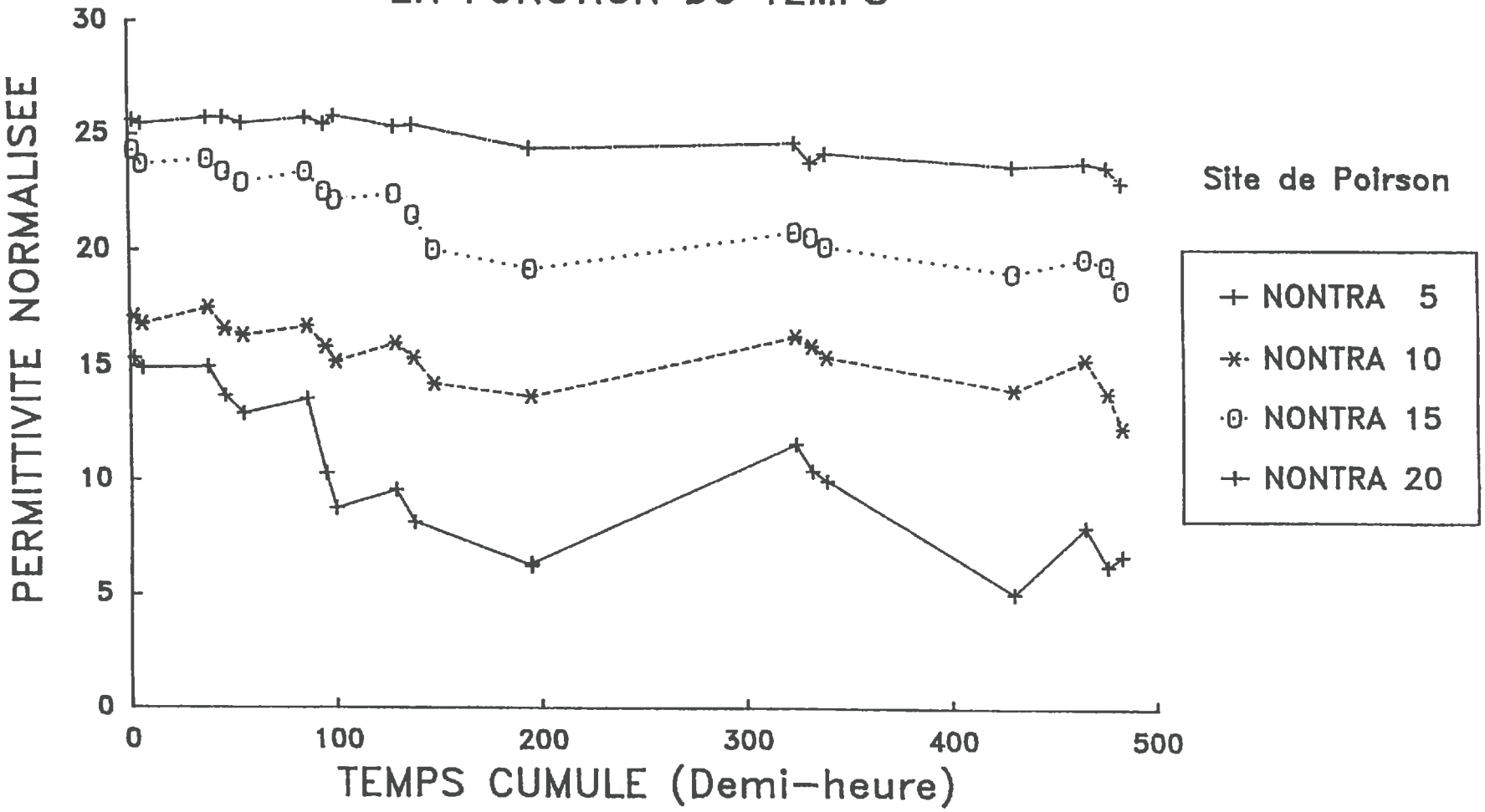


Fig24. suivi des sondes capacitives
en phase d'infiltration
collias 1988

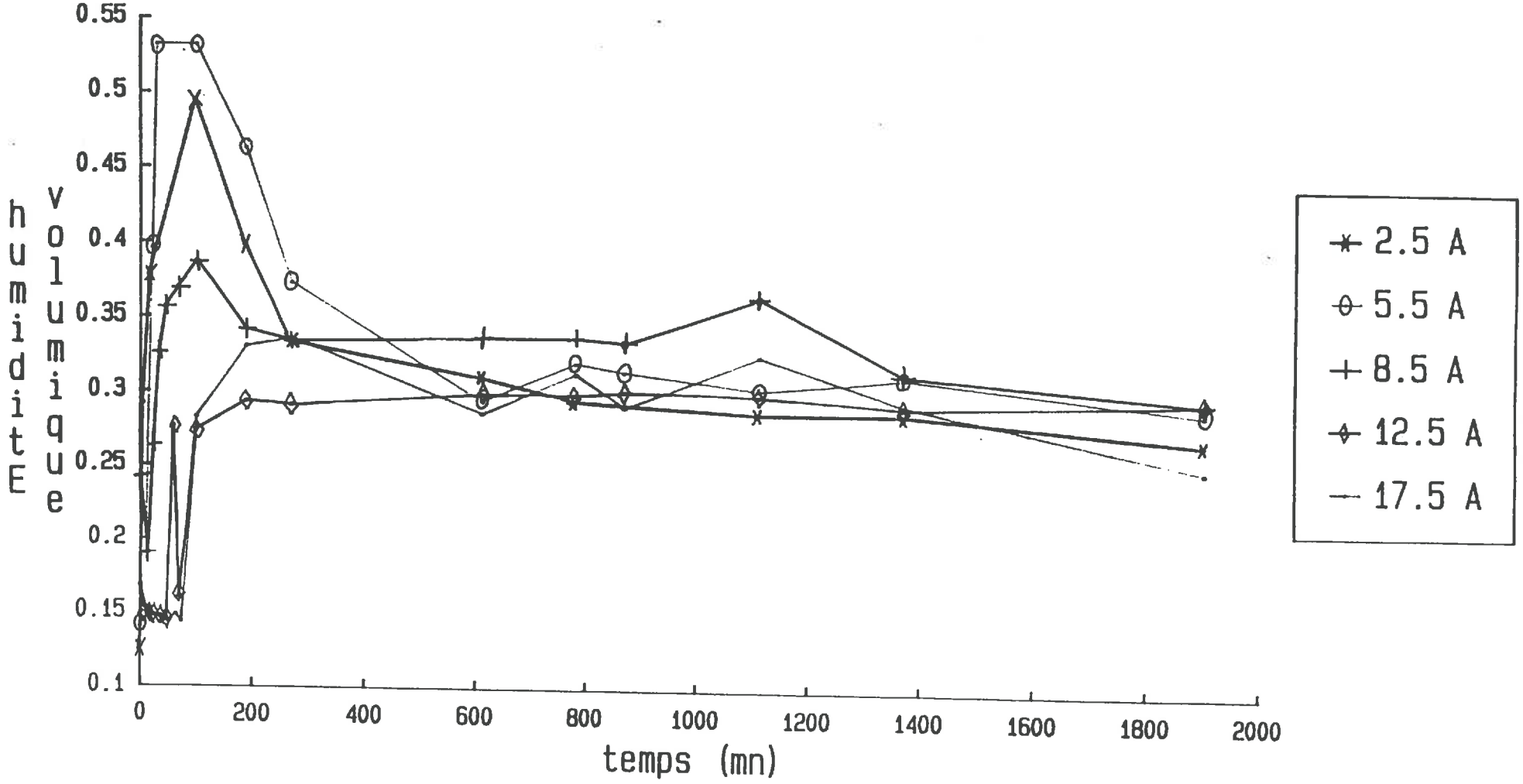
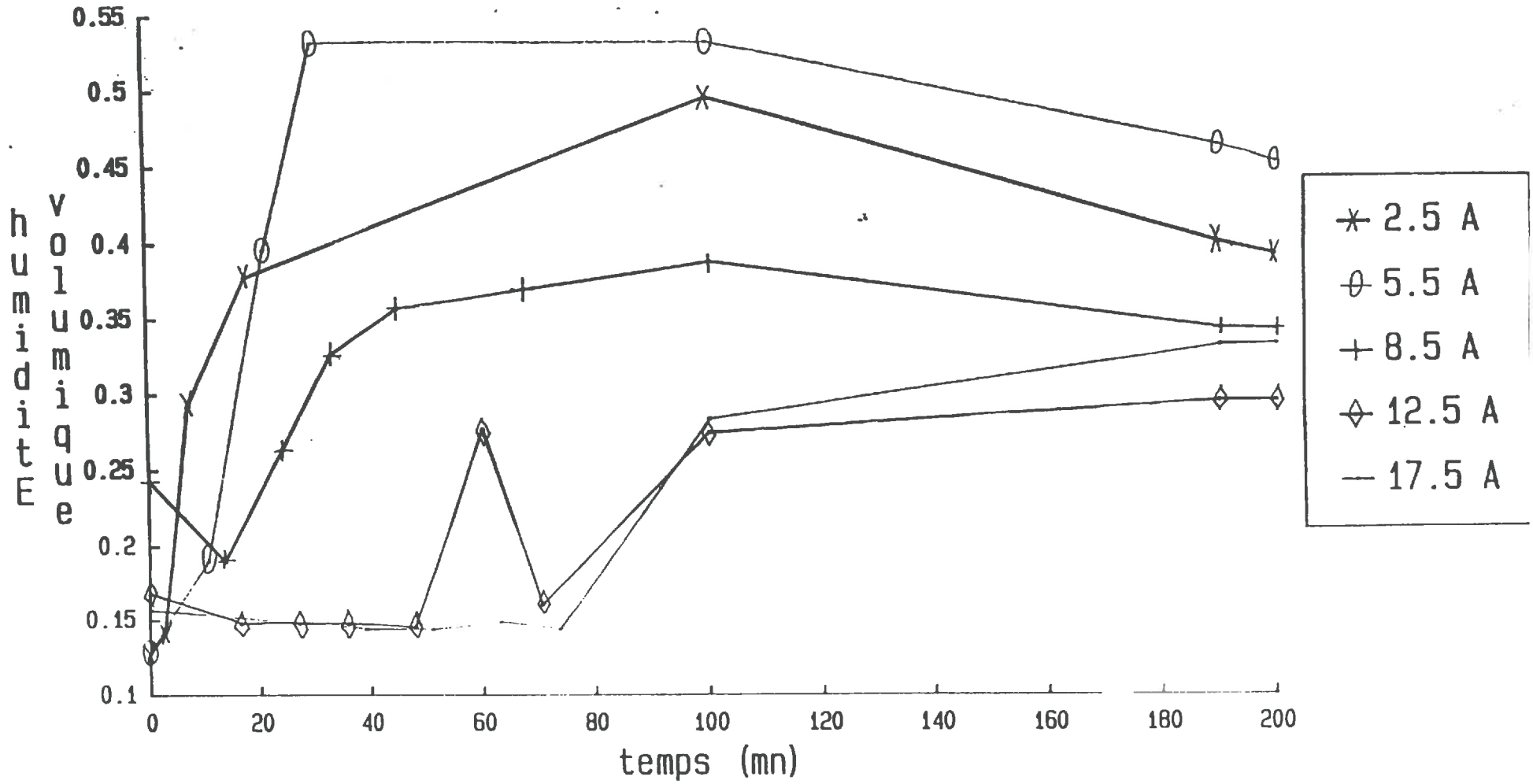


Fig 25 suivi des sondes capacitives
en phase d'infiltration
collias 1988



La figure 21 montre l'évolution en tendance de la teneur en eau sur l'essai non travaillé de POIRSON. On observe sur le graphe des amplitudes de variations de la teneur en eau d'autant plus grandes que la couche de sol est superficielle. Ce phénomène est vérifié tant dans la phase de dessication qu'après la réhumectation consécutive à la pluie de 10 mm survenue à 200 ½ heures.

La figure 22 montre les évolutions parallèles de la permittivité mesurée. La cohérence physique de la réponse est observable sur le classement des dynamiques de variations en fonction de la profondeur des capteurs.

On voit sur les évolutions temporelles des groupes de trois points correspondant aux données matin-midi-soir; on observe sur certains groupes de points des évolutions croissantes de la permittivité au cours de la journée. Ces évolutions ne sont pas incohérentes en termes de permittivité, si l'on tient compte des augmentations de température. Cependant, une fois la convertion en teneurs en eau opérée, on pourrait conclure à réhumectation diurne. Cette interprétation irait contre les lois de la physique.

6312 Rôle de la température.

La figure 23 présente des données de permittivité normalisées à 20°C au moyen du coefficient établi expérimentalement au laboratoire (§ 532). On voit alors que la normalisation de la permittivité est nécessaire au rétablissement d'une cohérence intrajournalière des données. On constate que la normalisation de la permittivité affecte également la dynamique générale des évolutions en tendance. Ce phénomène s'explique par des variations concomitantes et de tendances inverses de la température et de la teneur en eau.

On voit ici l'apport précieux des sondes capacitives pour l'observation des phénomènes siègeant à la surface du sol, et le caractère indispensable de la prise en compte de la température pour une bonne interprétation des données en permittivité.

6313 Infiltration d'une lame d'eau sur le site de collias.

La figure 24 montre l'évolution des teneurs en eau estimées avec les capteurs capacitifs pendant la phase d'infiltration de la parcelle "COLLIAS". On observe en particulier les phénomènes de saturation et de dessaturation très rapides au niveau de l'horizon le plus superficiel. Sur la figure 25, qui relate la première partie de l'essai, on relève le bon classement des capteurs par rapport à l'arrivée du front d'eau. L'humectation lente de ce sol peu contucteur à son état sec, et le front d'humectation très marqué, détectable ici par la brusque augmentation de la teneur en eau, ont par ailleurs déjà été constatés sur ce sol lors d'éxpériences précédentes (ABABOU, 1978).

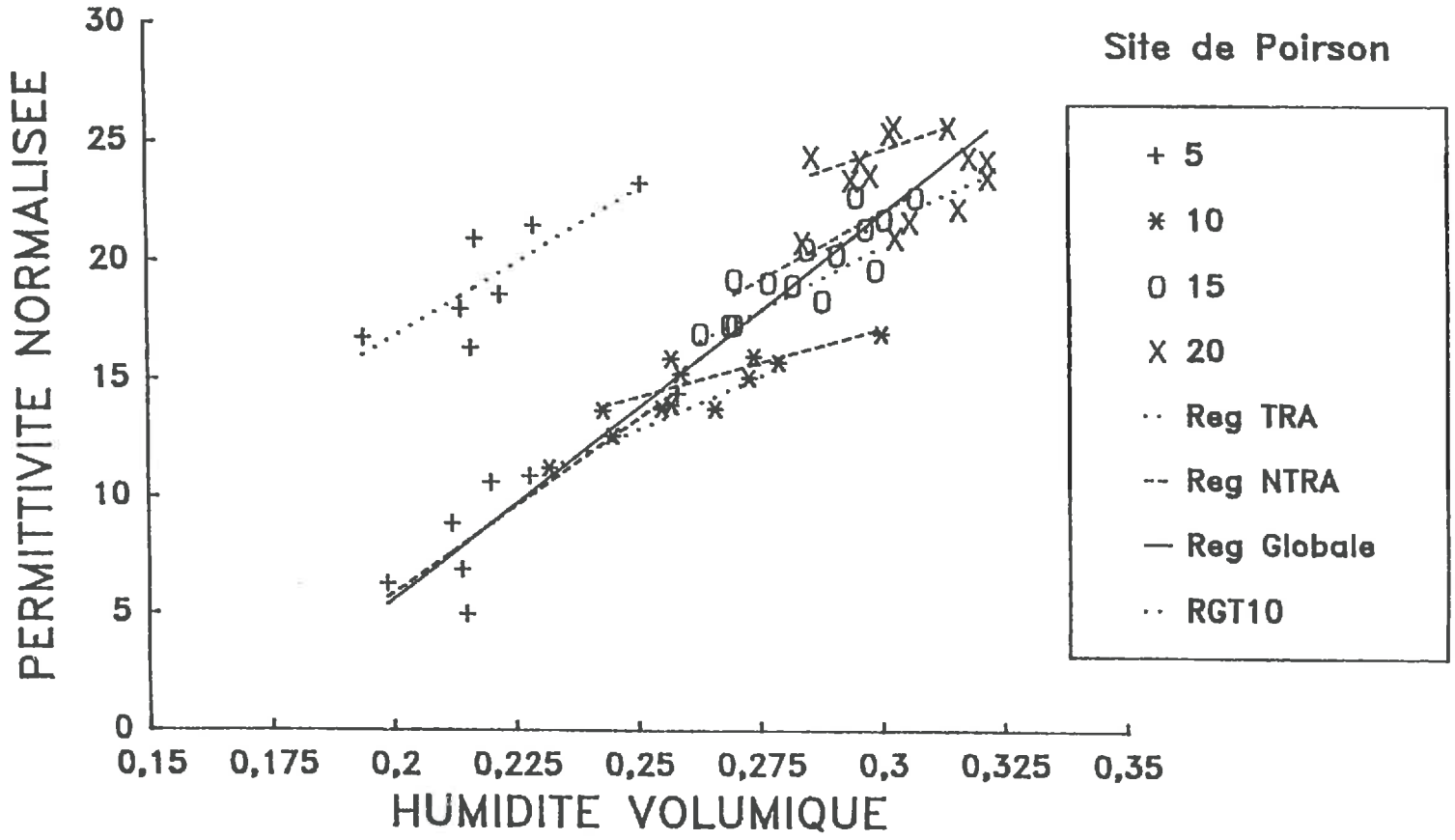
632 Etalonnage des capteurs.

On doit garder à l'esprit l'absence d'une méthode de référence locale et non destructive de mesure de la teneur en eau volumique. Pour cette raison, les permittivités sont correlées avec des observations réalisées sur la toute la surface des parcelles expérimentales. Les données de teneur en eau de reférence sont par conséquent affectées d'une erreur liée à la variabilité spatiale. Cette démarche expérimentale, rendue nécessaire par les objectifs de l'étude n'est pas particulièrement préconiée comme méthode d'étalonnage.

6321 Résultats de l'essai "POIRSON".

On observe en première approche la présence de deux sous nuages de points. Un premier nuage de points comprend les points expérimentaux relatifs au capteur situé a 5 cm dans le site travaillé. Le second sous nuage comprend l'ensemble des autres points expérimentaux. La démarche consistant à confondre ces points expérimentaux dans un seul sous nuage est fondée statistiquement. Mais l'ajustement de ce nuage à une seule droite conduit à une aberration physique puisque son ordonnée à l'origine (A_0 = -9.96) signifirait que la matrice solide est affectée d'une permittivité négative. Il semble donc que chaque capteur doive être étalonné individuellement. Par ailleurs, l'ordonnée à l'origine obtenue pour le capteur installé à 5 cm dans le site travaillé est compatible avec les observations effectuées au laboratoire sur le sol de même texture.

FIG. 26: PERMITTIVITE NORMALISEE
EN FONCTION DE L'HUMIDITE VOLUMIQUE
DONNEES MOYENNEES



On observe que les pentes obtenues pour les deux capteurs les plus superficiels sont les plus importantes. Les zones d'implantation de ces capteurs sont également celles où la teneur en eau subit la plus grande étendue de variation. Les valeurs absolues des pentes sont ici affectées d'une erreur importante. Elles ne peut être comparées à celle qui a été obtenue en laboratoire dans la mesure où la site d'implantation des capteurs n'est pas nécessairement représentatif de la parcelle.

6322 Résultats de l'essai "COLLIAS".

La teneur en eau sur cet essai a subi une variation de plus forte amplitude. les corrélations obtenues sont meilleures que dans le cas précédent pour les nuages de points correspondant à chaque capteurs. Il apparaît ici plus clairement qu'un étalonnage doit être fait individuellement pour chaque capteur.

Il apparaît également en première approche que les pentes ne sont pas significativement différentes entre capteurs localisés sur un même site d'observation.

Au vu de l'ensemble des résultats de terrain, il semble que la sructure du sol au lieu d'implantation du capteur soit déterminante sur l'ordonnée à l'origine de sa relation individuelle d'étalonnage. Cette impression d'ensemble est renforcée par l'examen des résultats de l'expérience de laboratoire relative au rôle de la structure sur la relation permittivité-teneur en eau. Il est nécessaire de procéder à un examen plus aprofondi du rôle de la structure du sol sur la pente de la relation $\epsilon' = f(\theta)$. On comprend en effet difficilement comment la sructure peut influencer la valeur de cette pente et, en fait, la valeur de la permittivité effective de l'eau du sol. Sous l'hypothèse où l'on parviendrait à démontrer l'existance d'une pente unique pour la relation permittivité-teneur en eau (par type textural de sol), on pourrait alors envisager de simplifier considérablement les opérations d'étalonnage *in-situ* des capteurs.

7 CONCLUSIONS: BILAN DE L'EXPERIMENTATION, CONSEQUENCES SUR L'EVOLUTION DU CAPTEUR ET SUR LES AMELIORATIONS A APPORTER AU CAPTEUR ACTUEL.APPORTS DE CETTE TECHNIQUE.

L'effort de mise au point de ce capteur permet uneamélioration incontestable de la faisabilité des mesures, et de leur qualité.générale.L'interprétation des résultats s'en trouve simplifiée.

Cependant, il reste à préciser quelques points de l'étude expérimentale qui permettront de simplifier les opérations d'étalonnage in situ.

De même, l'utilisation de ce capteur ne peut se concevoir sans acquisition automatique des données. L'amélioration du capteur dans ce sens est la priorité absolue dans les efforts qu'il reste à fournir. L'adjonction au capteur d'un dispositif de mesure, ou de correction, de la température est très fortement souhaité.

Au travers des évolutions temporelles de la permittivité observée au champ, on peut entrevoir les performances intrinsèques de la méthode capacitive. Les protocoles adoptés sur les expérimentations de terrain laissent deviner la lourdeur des observations requises pour l'obtention de résultats d'une qualité équivalente dans le cadre de nos moyens métrologiques actuels. La mise à disposition des chercheurs d'une technique de cette qualité permettraient non seulement des débloquages certains dans l'observation de nombreux phénomènes, mais également un allègement considérable de la charge de travail requise lors des expérimentations au champ.

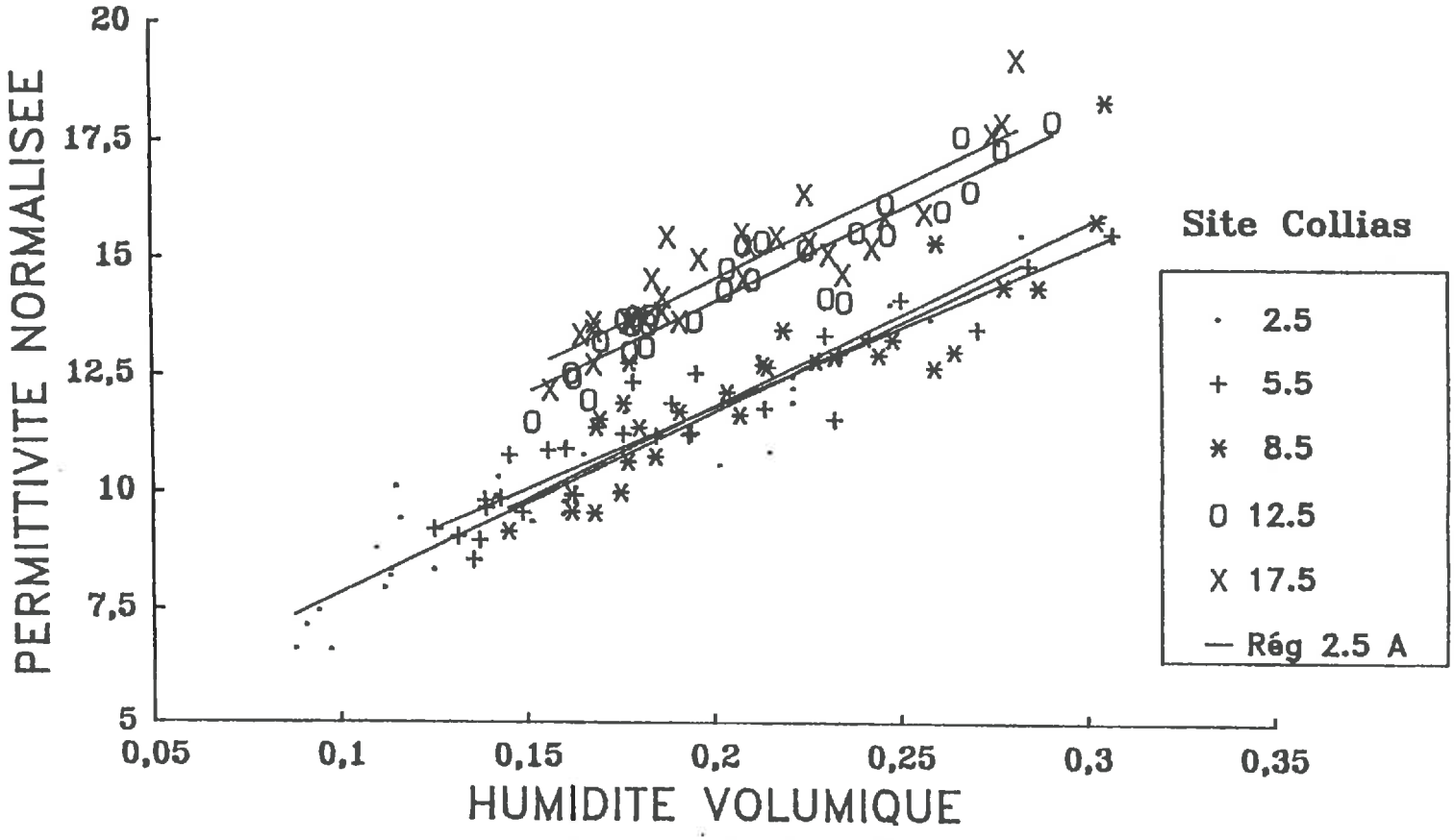



FIG. 27: PERMITTIVITE NORMALISEE
EN FONCTION DE L'HUMIDITE VOLUMIQUE