



HAL
open science

Sonde capacitive pour la mesure in situ de la teneur en eau d'un sol.

Pierre Stengel, J.C. Gaudu, Patrick Bertuzzi

► **To cite this version:**

Pierre Stengel, J.C. Gaudu, Patrick Bertuzzi. Sonde capacitive pour la mesure in situ de la teneur en eau d'un sol.. N° de brevet: 89-15135. 1992, 49 p. hal-02851510

HAL Id: hal-02851510

<https://hal.inrae.fr/hal-02851510>

Submitted on 7 Jun 2020

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

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

DECISION

DE DELIVRANCE D'UN BREVET D'INVENTION

D'UN CERTIFICAT D'ADDITION OU D'UN CERTIFICAT D'UTILITE

LE DIRECTEUR GENERAL DE L'INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIETE INDUSTRIELLE

VU la loi modifiée n° 68-1 du 2 janvier 1968 sur les brevets d'invention, ensemble le décret modifié n° 79-822 du 19 septembre 1979 pris pour son application et l'arrêté du 19 septembre 1979;

VU la demande déposée le 17.11.89 sous le titre :
SONDE CAPACITIVE POUR LA MESURE IN SITU DE LA TENEUR EN EAU D UN SOL

DÉCIDE

Article 1er

Le brevet d'invention n° 89 15135 dont le texte est annexé à la présente décision est délivré à INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE INRA.

Article 2

Mention de la délivrance sera faite au Bulletin Officiel de la propriété industrielle n° 92/18 du 30.04.92 (n° de publication 2 654 834).

Fait à Paris, le 30.04.92.

Le directeur général de l'institut
national de la propriété industrielle



J.C. COMBALDIEU

LOI MODIFIÉE N° 51-444 DU 19 AVRIL 1951
créant un Institut National
de la Propriété Industrielle

Article 3

Le directeur de l'Institut national de la propriété industrielle n'est pas soumis à l'autorité de tutelle pour les décisions lui incombant en matière de délivrance, rejet ou maintien des titres de propriété industrielle. Les cours d'appel désignées par décret connaissent directement des recours formés contre ses décisions. Il y est statué, le ministre public et le directeur de l'Institut national de la propriété industrielle entendus. Le pourvoi en cassation est ouvert tant au demandeur qu'au directeur de l'Institut national de la propriété industrielle.

LOI MODIFIÉE N° 68-1 DU 2 JANVIER 1968
sur les brevets d'invention

Article 1er

Sous les conditions et dans les limites fixées par la présente loi, toute invention peut faire l'objet d'un titre de propriété industrielle délivré par le directeur de l'Institut national de la propriété industrielle qui cède à son titulaire ou à ses ayants cause un droit exclusif d'exploitation.

Article 21

Après l'accomplissement de la procédure prévue aux articles 19 et 20 le brevet est délivré. Tous les titres délivrés comprennent la description, s'il y a lieu les dessins, les revendications et s'il s'agit d'un brevet, l'avis documentaire.

Article 22

Les mentions relatives à la délivrance des brevets sont publiées au Bulletin officiel de la propriété industrielle.

DÉCRET MODIFIÉ N° 79-822 DU
19 SEPTEMBRE 1979

Article 55

Le brevet est délivré au nom du demandeur par décision du directeur de l'Institut national de la propriété industrielle. Notification de cette décision est faite au demandeur.

Article 57

Mention de la délivrance du brevet est publiée au Bulletin officiel de la propriété industrielle dans le délai d'un mois à compter de la date de la notification de délivrance faite au demandeur. ... A la suite de cette publication, un exemplaire certifié conforme du brevet est adressé au demandeur.

Article 64

... La taxe annuelle pour le maintien en vigueur des demandes de brevet ou des brevets est due pour chaque année de la durée des brevets. Le paiement de cette taxe vient à l'échéance le dernier jour du mois de la date anniversaire du dépôt de la demande de brevet; il ne peut être accepté s'il est fait plus d'une année avant l'échéance de la taxe annuelle.

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
—
PARIS
—

①1 N° de publication : 2 654 834
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : 89 15135

⑤1 Int Cl^e : G 01 N 27/22, 33/24; G 01 R 27/26.

①2

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 SONDE CAPACITIVE POUR LA MESURE IN SITU DE LA TENEUR EN EAU D UN SOL

②2 Date de dépôt : 17.11.89.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public
de la demande : 24.05.91 Bulletin 91/21.

④5 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 30.04.92 Bulletin 92/18.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport
de recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : INSTITUT NATIONAL DE LA
RECHERCHE AGRONOMIQUE INRA. -FR.

⑦2 Inventeur(s) : STENGEL PIERRE - GAUDU
JEAN CLAUDE - BERTUZZI PATRICK

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : INSTITUT NATIONAL DE LA
RECHERCHE AGRONOMIQUE

FR 2 654 834 - B1



La présente invention concerne une sonde capacitive pour la mesure in situ de la teneur en eau d'un sol.

L'invention vise également, à titre de moyen constitutif de la sonde précitée, un oscillateur haute fréquence de conception optimisée pour s'affranchir de la source d'erreur liée aux mesures capacitatives actives et pour obtenir une mesure linéarisée de la partie réelle d'une permittivité diélectrique, ainsi qu'un procédé d'optimisation des dimensions de ladite sonde et de la forme du volume de matériau pris en compte par la mesure réalisée au moyen de celle-ci.

Il est possible de mesurer la teneur en eau d'un matériau en soumettant celui-ci à un champ électrique afin d'en déterminer les propriétés diélectriques. La présente invention vise en particulier l'optimisation des électrodes utilisées pour de telles mesures. En effet, un grand nombre de capteurs destinés à cet effet ont été réalisés et différents notamment par la géométrie des électrodes que l'on peut adapter facilement à divers types d'utilisation.

Selon la présente invention, dans laquelle on cherche à réaliser des mesures de teneur en eau dans les sols, le choix des électrodes est motivé par des considérations de plusieurs ordres.

En premier lieu, la réalisation des mesures ne doit pas perturber les phénomènes qui se déroulent sur le site de mesure ou à proximité de celui-ci. De ce point de vue, le sol est un milieu déformable et fragile dans un grand nombre de circonstances. Toute action mécanique sur ce dernier se traduit en particulier par des conséquences plus ou moins importantes sur les écoulements et la répartition de l'eau, objet des mesures. Par conséquent, il convient d'implanter le capteur ou la sonde verticalement à partir de la surface du sol, dans une cavité préalablement forée à l'aide d'une tarière. L'introduction en force de la sonde, ou son installation à partir d'une tranchée creusée à proxi-

mité du site de mesure, sont des modes d'implantation rejetés a priori.

Les phénomènes dont on cherche à rendre compte nécessitent la réalisation de mesures dans de nombreuses localisations du milieu. L'implantation des sondes doit par conséquent être faisable, en plus de la contrainte de perturbation déjà évoquée. La forme la mieux adaptée à la réalisation facile d'avant-trous est généralement le cylindre.

La méthode de mesure visée par l'invention permet potentiellement de rendre compte de phénomènes très localisés qui se déroulent sur une échelle spatiale d'ordre centimétrique. La géométrie du volume de sol pris en compte par la mesure est primordiale de ce point de vue. Ainsi, on recherche, compte-tenu du mode d'implantation souhaité, une extension du volume de mesure faible dans l'axe de la sonde, et plus importante dans le plan perpendiculaire à celui-ci.

En outre, de nombreuses applications nécessitent un séjour des sondes dans le sol. Certains types de sol présentent des phénomènes de retrait-gonflement accompagnés de fissurations. Le risque que des fissures apparaissent préférentiellement entre des électrodes disposées selon plusieurs axes conduit à rejeter une géométrie multi-axiale des électrodes.

Les contraintes précitées sont peu dissociables dans le cas de l'invention. La solution adoptée par l'invention résulte ainsi d'un compromis qui permet de prendre en compte l'ensemble desdites contraintes.

La connaissance de la permittivité électrique d'un sol conduit à l'obligation de mesurer facilement la partie réelle ϵ' de cette permittivité en éliminant la partie imaginaire ϵ'' de celle-ci. Ainsi, l'invention vise également à proposer un modèle d'oscillateur haute fréquence qui permet d'exprimer l'effet de ϵ'' (effet de la conductance) sur la fréquence de celui-ci. Il convient également de prévoir un asservissement au sein même de la sonde qui permet d'élimi-

ner cette source d'erreur. Une optimisation détaillée permet la réalisation de sondes fidèles, petites et reproductibles, de précision satisfaisante. La sonde conforme à l'invention comprend également le traitement nécessaire à l'affichage
5 direct de la partie réelle de la permittivité.

L'intérêt des profils hydriques et de leur évolution n'est plus à démontrer en agronomie et en génie civil. Les deux méthodes usuelles pour appréhender la teneur en eau, sont la méthode gravimétrique et la méthode
10 neutronique. Cependant, quelques chercheurs ont utilisé la corrélation entre la partie réelle de la permittivité relative du sol et la teneur en eau du sol. Les premières approches furent faites à l'aide de ponts d'impédance (capteurs passifs) jusqu'à des fréquences de l'ordre de 25 MHz (G.
15 MANIERE et al., 1974, TRAN NGOC LAN et al, 1970 et 1972).

Les résultats obtenus montrent une corrélation entre la teneur en eau et la capacité (exprimée en farads), pour une géométrie d'électrodes déterminée. D'autres chercheurs se sont orientés vers des capteurs actifs (source
20 haute-fréquence incorporée au sein du capteur). Dans ce cas également, une corrélation a été établie entre la teneur en eau et la fréquence de l'oscillateur (exprimée en Hertz) (AMBROSINO, 1972, R. BERNARD et al., 1984, A. DUPAS et al., 1980, M. MALICKI, 1983, TRAN NGOC LAN et al., 1974, D.
25 WOBSCHELL, 1978).

Malheureusement, les résultats précités en farads ou en Hertz sont difficilement transposables en grandeur universelle caractérisant le comportement électrique du sol (permittivité). Ainsi, l'exploitation et la synthèse des
30 données bibliographique est délicate, voire impossible. C'est pourquoi, l'un des buts de la présente invention est de préciser le comportement électrique des sols dans un domaine de fréquence où la technologie permet la réalisation de capteurs fidèles et peu coûteux (gamme de fréquences de
35 10 à 100 MHz).

Un autre but de l'invention est de proposer une sonde ou un capteur optimisé, à affichage direct de la partie réelle de la permittivité ϵ_r , et qui permet d'éliminer les sources d'erreurs liées au principe même de la méthode
5 de mesure mise en oeuvre.

La présente invention propose donc une sonde capacitive pour la mesure in situ de la teneur en eau du sol, caractérisée en ce qu'elle comprend deux électrodes coaxiales dont l'une constitue une extension cylindrique d'extré-
10 mité d'un corps cylindrique de sonde et dont l'autre, con- formée en pointe, prolonge, du côté de l'électrode d'extré- mité, et dans l'axe X-X' du corps, ledit corps dans lequel sont noyés, dans un matériau isolant de remplissage, des
15 moyens de mesure électroniques de la capacité constituée par les électrodes précitées qui sont électriquement reliées auxdits moyens de mesure, l'électrode en pointe de pénétra- tion étant maintenue en place par au moins un bouchon annu- laire isolant dont est également rendue solidaire l'électro- de d'extrémité.

20 Avec une telle configuration, la résolution de la mesure souhaitée est atteinte et la possibilité d'observer des phénomènes très localisés à la surface du sol est en particulier garantie. En outre, on peut facilement réaliser une cavité dont la forme épouse parfaitement celle du corps
25 du capteur, au moyen d'une tarière adaptée. L'enfoncement en force de l'électrode de pénétration n'occasionne que des perturbations négligeables du matériau. Par ailleurs, bien que les perturbations du matériau occasionnées lors de la réalisation de l'avant-trou ne soient jamais totalement ab-
30 sentes, du fait en particulier d'actions de lissage au pas- sage de la tarière, le volume de matériau soumis à la mesure de la sonde est reporté, dans le cas de l'invention, pour l'essentiel hors du volume perturbé.

Selon une première caractéristique avantageuse, le
35 bouchon qui est de préférence en polyamide, comprend une

saillie annulaire axiale qui s'étend à l'intérieur du corps de sonde et qui entoure fermement l'extrémité de l'électrode de pénétration noyée dans le corps, ainsi qu'une collerette périphérique contre laquelle est fixée l'électrode d'extrémité. Le choix du polyamide pour la réalisation du bouchon isolant est motivé par les propriétés mécaniques de ce matériau. Le bouchon supporte en effet l'électrode de pénétration.

Selon une autre caractéristique avantageuse de l'invention, les électrodes sont en acier inoxydable et l'électrode de pénétration est reliée par vissage à un élément en acier doux de raccordement électrique auxdits moyens électroniques de mesure qui doivent être placés au plus près des électrodes.

De préférence, le corps de sonde est rempli de résine époxyde dont la température de polymérisation est inférieure ou égale à 50°C. Cette résine époxyde est choisie parmi les isolants électriques de très bonne qualité et ne doit pas se polariser à la fréquence d'oscillation déterminée des moyens électroniques de mesure.

Selon un autre aspect de l'invention, la surface intérieure du corps de sonde comporte un revêtement métallique destiné à protéger les moyens électroniques de mesure de tout parasite lié à l'environnement électrique. En outre, la surface extérieure des électrodes présente des aspérités destinées à améliorer le contact de ces électrodes avec le sol et l'émission du champ électrique. Par ailleurs, la paroi du corps de sonde est en PVC et est prolongée, du côté opposé aux électrodes, par un manchon en PVC formant moyen de prolongation du corps de sonde.

Selon un autre aspect de l'invention, les moyens électroniques de mesure de la sonde comprennent un commutateur d'isolation dont une borne est reliée à l'une des électrodes et dont l'autre borne est reliée à une première borne d'une self-inductance, à une première borne d'un condensa-

teur et à une première entrée d'un circuit oscillateur dont une autre entrée est également reliée à la seconde borne du condensateur, à la seconde borne de la self-inductance et à l'autre électrode, lesdits moyens électroniques de mesure de la sonde étant conçus pour mesurer les variations de fréquence de résonance du circuit oscillateur induites par la valeur de la capacité introduite lors de l'introduction de la sonde dans le sol.

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention, le commutateur précité est conçu pour être actionné à une fréquence de 0,5 Hz en vue d'isoler les électrodes à chaque période de commutation, de sorte que deux mesures de fréquence sont effectuées, avec et sans prise en compte de la capacité du sol, et que la différence de fréquence obtenue est seulement fonction de la valeur de la capacité constituée par le système électrode-sol.

De préférence, le circuit oscillateur précité est optimisé pour que l'excursion en fréquence de celui-ci ne dépasse pas $\pm 5\%$ de sa fréquence nominale qui est déterminée par les valeurs de la self-inductance et de la capacité du condensateur.

Selon un autre aspect de l'invention, la sortie de l'oscillateur est appliquée à un circuit de traitement extérieur comprenant des moyens de comptage de fréquence reliés à des moyens de traitement de variation de fréquence, eux-mêmes reliés à des moyens d'affichage de la partie réelle de la permittivité électrique du sol.

Selon l'invention, le circuit oscillateur est conçu, de manière optimisée, pour procurer une mesure linéarisée de la partie réelle de la permittivité électrique du sol, qui soit indépendante de la partie imaginaire de cette permittivité. A cet effet, le circuit oscillateur comprend un élément actif formant admittance dont une entrée est reliée à l'une des électrodes et dont l'autre entrée est reliée à l'autre électrode, la self-inductance et le condensa-

teur étant reliés, en parallèle, entre les deux entrées précitées de l'élément actif dont la sortie est reliée à l'une de ses deux entrées et à un circuit amplificateur, la sortie dudit circuit amplificateur étant appliquée à l'entrée d'un circuit détecteur dont la sortie est appliquée à la première entrée d'un circuit comparateur, la seconde entrée dudit comparateur recevant une consigne d'amplitude telle que ce comparateur délivre, en sortie, un courant de polarisation appliqué à l'élément actif, qui est proportionnel à la partie réelle de l'admittance définie par l'élément de circuit actif, la tension aux bornes dudit circuit étant maintenue sensiblement constante, tandis que la pulsation de coupure du circuit est dépendante de ladite tension et du courant de polarisation du circuit actif.

De manière avantageuse, la sortie du circuit amplificateur est reliée, par l'intermédiaire de moyens d'adaptation, à des moyens d'affichage de la partie réelle de la permittivité du sol formant permimètre et étalonnés sur la base de mesures dans l'air et l'éthanol, pour s'affranchir de la capacité parasite introduite par la sonde elle-même.

L'invention propose également un procédé d'optimisation des dimensions de la sonde ayant les caractéristiques précitées et de la forme du volume de matériau pris en compte par la mesure réalisée au moyen de cette sonde, caractérisé par les étapes consistant à:

a - introduire la sonde dans un liquide de propriétés diélectriques connues, contenu dans un récipient de grandes dimensions,

b - le barycentre du volume de mesure ayant été défini, effectuer des mesures de permittivité pour différentes cotes d'enfoncement z de celui-ci dans le liquide,

c - établir une relation expérimentale entre le complément à un de l'erreur relative sur la permittivité du liquide E et ladite cote d'enfoncement, du type

$$1 - \frac{\Delta E}{E} = f(z)$$

d - répéter les étapes b) et c) en disposant l'axe de la sonde selon plusieurs angles A formés avec la surface du liquide,

e - repérer sur les différentes courbes expérimentales déduites des mesures précitées, les distances correspondant à différents critères d'erreur choisis selon l'équation

$$1 - \frac{\Delta E}{E} = X$$

f - pour chaque critère, reporter les distances précitées sur des demi-droites ayant pour origine le barycentre (B), et formant un angle $(A - \frac{\alpha}{2})$ avec l'axe de la sonde,

g - relier entre eux les points d'égale erreur pour constituer des contours d'iso-erreur ou d'iso-influence de la proximité de l'air sur la mesure de la permittivité du liquide.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront encore de la description qui va suivre.

Aux dessins annexés donnés à titre d'exemples non limitatifs:

La Figure 1 est une vue en coupe longitudinale partielle, avec arrachement, d'une sonde capacitive conforme à l'invention,

La Figure 2 est un schéma-bloc des moyens électroniques de mesure associés à la sonde de la Figure 1,

La Figure 3 est un schéma qui illustre l'équivalence du système d'électrodes de la sonde de la Figure 1,

Les Figures 3A et 3B sont des graphes qui illustrent le comportement de la partie réelle de la permittivité et de la partie imaginaire de celle-ci d'un milieu à un constituant polaire, la Figure 3A correspondant à un spectre

de dispersion, la Figure 3B à un spectre d'absorption,

La Figure 4 est un schéma de principe du circuit oscillateur conforme à l'invention,

La Figure 5 est un graphe qui illustre le comportement d'un modèle de transconductance non linéaire,

La Figure 6 est un schéma de principe de l'oscillateur asservi selon l'invention,

La Figure 7 représente les deux états de la sonde lors de la mesure,

La Figure 8 est un schéma synoptique de la sonde et de ses moyens de traitement,

Les Figures 8A à 8D sont des diagrammes temporels qui illustrent le fonctionnement des moyens de traitement et d'affichage associés aux moyens électroniques de mesure de la sonde,

La Figure 8E illustre la linéarité de l'affichage de la partie réelle de la permittivité à conductance de sol nulle,

La Figure 8F est un diagramme qui illustre la linéarité de l'affichage de la partie réelle de la permittivité pour différentes conductances de sol, à conductance de sol non nulle, et

Les Figures 9 à 11 illustrent le procédé conforme à l'invention pour optimiser les dimensions de la sonde et de la forme du volume de matériau pris en compte par la mesure réalisée au moyen de celle-ci.

La Figure 12 est un graphe sur lequel sont représentées les courbes de la permittivité en fonction de la teneur en eau volumique déterminées expérimentalement pour différentes textures de sols.

La Figure 13 est un graphe donnant, pour un site particulier, et pour différentes profondeurs, des relations expérimentales d'étalonnage de la permittivité en fonction de la teneur en eau.

Les Figures 14 et 15 sont des graphes illustrant,

pour un même site, les évolutions respectives en fonction du temps de mesures de permittivité et de mesures de teneur en eau obtenues par la méthode classique gravimétrique.

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 charge 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, c'est-à-dire $\epsilon_r = \epsilon' - j \epsilon''$, expression dans laquelle ϵ_r est la permittivité diélectrique complexe (sans dimension), ϵ' est la composante réelle de la permittivité qui traduit l'aptitude du diélectrique à se polariser et ϵ'' est la composante imaginaire de la permittivité, c'est-à-dire la composante traduisant les phénomènes de pertes diélectriques responsables du déphasage entre le champ appliqué et la polarisation.

Le principe de la mesure in situ de la teneur en eau du sol, au moyen de la sonde capacitive conforme à l'invention, consiste à introduire deux électrodes 2, 4 (voir Figure 1) dans le sol. Le dispositif ainsi constitué, est alors assimilé, du point de vue électrique, à un condensateur avec pertes (c'est-à-dire une capacité parfaite ayant une résistance de fuite r en parallèle (voir Figure 2)). Comme on le verra plus loin, dans le cas de l'invention, le condensateur ainsi constitué est inséré dans un circuit dont

on mesure les variations de fréquence de résonance liées à la valeur de la capacité introduite.

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 l'influence de la teneur en eau sur la permittivité du sol, s'explique par le contraste important existant entre la permittivité diélectrique de l'eau libre et de celle de ses autres constituants. Ainsi, la permittivité de l'eau libre est égale à 80, la permittivité de l'air est égale à 1 tandis que la permittivité de la phase solide du sol est comprise entre 2 et 10.

Les considérations théoriques qui ont été mises en oeuvre pour élaborer les moyens de mesures électroniques de la sonde capacitive seront décrites en détail ci-après. La miniaturisation de ces moyens de mesure électroniques a été recherchée de sorte que ces moyens puissent être introduits ou disposés dans une sonde de petite dimension, au plus près des électrodes 2 et 4 de celle-ci. Ainsi, la sonde capacitive conforme à l'invention comprend (voir Figure 1) deux électrodes coaxiales 2, 4 dont l'une 2 constitue une extension cylindrique d'extrémité d'un corps cylindrique de sonde 1 et dont l'autre 4, conformée en pointe, dite électrode de pénétration, prolonge, du côté de l'électrode d'extrémité 2 et dans l'axe X-X' du corps 1, ledit corps 1 dans lequel sont noyés, dans un matériau isolant de remplissage, des moyens de mesure électroniques 8 de la capacité constituée par les électrodes 2 et 4 qui sont électriquement reliées auxdits moyens de mesure.

L'électrode en pointe de pénétration 4 est maintenue en place par au moins un bouchon annulaire isolant électriquement 3 dont est également rendue solidaire l'électrode d'extrémité 2. Ce bouchon 3 comprend à cet effet une saillie annulaire axiale 6a qui s'étend à l'intérieur du corps de sonde 1 et qui entoure fermement l'extrémité de l'électrode de pénétration 4 noyée dans le corps 1, ainsi qu'une collette périphérique 6b contre laquelle est fixée l'électrode d'extrémité 2. Selon une caractéristique préférentielle de l'invention, le bouchon 3 précité est réalisé en polyamide dont la qualité des propriétés mécaniques est mise à profit dans cette invention.

Les électrodes 2 et 4 sont de préférence réalisées en acier inoxydable et l'extrémité interne de l'électrode de pénétration 4 est reliée par vissage à un élément 5 en acier doux qui facilitera le raccordement électrique par soudure de cette électrode 4 auxdits moyens électroniques de mesure. Le corps de sonde 1 est rempli de résine époxyde dont la température de polymérisation est inférieure ou égale à 50°C, qui est un bon isolant électrique et qui ne se polarise pas à la fréquence d'oscillation utilisée pour la sonde.

Selon d'autres caractéristiques de l'invention, la surface intérieure du corps de sonde 1 comporte un revêtement métallique destiné à protéger les moyens électroniques de mesure de tout parasite lié à l'environnement électrique, la surface extérieure des électrodes 2, 4 présente des aspérités (non représentées à la Figure 1) destinées à améliorer le contact de ces électrodes avec le sol et l'émission du champ électrique, la paroi du corps de sonde 1 est en PVC (polyvinyle chloride) et est prolongée, du côté opposé aux électrodes 2, 4, par un manchon 6 également en PVC qui forme moyen de prolongation de ce corps de sonde 1.

Selon une forme de réalisation pratique de l'invention, le corps de sonde 1 possède un diamètre d'environ 20 mm et une longueur d'environ 100 mm.

La fréquence d'oscillation des moyens de mesure électroniques de la sonde a été fixée à 38 MHz. Le choix de la fréquence est lié au spectre herzien du système sol humide-électrodes. La bande 0 Hz - 1 MHz 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 à respecter.

Selon l'invention, les moyens électroniques de mesure 8 de la sonde comprennent (voir Figure 2), un commutateur d'isolation 10 dont une borne est reliée à l'une 4 des électrodes de la sonde et dont l'autre borne est reliée à une première borne d'une self-inductance 11, à une première borne d'un condensateur 12 et à une première entrée d'un circuit oscillateur 13 dont une autre entrée est également reliée à la seconde borne du condensateur 12, à la seconde borne de la self-inductance 11 et à l'autre électrode 2. En particulier, les moyens électroniques précités de mesure de la sonde sont conçus pour mesurer les variations de fréquence du circuit oscillateur 13 induites par la valeur C_{cap} de la capacité introduite lors de l'introduction de la sonde dans le sol.

Le commutateur 10 est conçu pour être actionné à une fréquence de 0,5 Hz, en vue d'isoler les électrodes 2 et 4 à chaque période de commutation, de sorte que deux mesures de fréquence sont effectuées avec et sans prise en compte de la capacité du sol, et que la différence de fréquence obtenue est seulement fonction de la valeur de la capacité constituée par le système électrodes - sol. Le circuit

La fréquence d'oscillation des moyens de mesure électroniques de la sonde a été fixée à 38 MHz. Le choix de la fréquence est lié au spectre herzien du système sol humide-électrodes. La bande 0 Hz - 1 MHz 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 à respecter.

Selon l'invention, les moyens électroniques de mesure 8 de la sonde comprennent (voir Figure 2), un commutateur d'isolation 10 dont une borne est reliée à l'une 4 des électrodes de la sonde et dont l'autre borne est reliée à une première borne d'une self-inductance 11, à une première borne d'un condensateur 12 et à une première entrée d'un circuit oscillateur 13 dont une autre entrée est également reliée à la seconde borne du condensateur 12, à la seconde borne de la self-inductance 11 et à l'autre électrode 2. En particulier, les moyens électroniques précités de mesure de la sonde sont conçus pour mesurer les variations de fréquence du circuit oscillateur 13 induites par la valeur C_{cap} de la capacité introduite lors de l'introduction de la sonde dans le sol.

Le commutateur 10 est conçu pour être actionné à une fréquence de 0,5 Hz, en vue d'isoler les électrodes 2 et 4 à chaque période de commutation, de sorte que deux mesures de fréquence sont effectuées avec et sans prise en compte de la capacité du sol, et que la différence de fréquence obtenue est seulement fonction de la valeur de la capacité constituée par le système électrodes - sol. Le circuit

oscillateur 13 précité est en particulier optimisé pour que l'excursion en fréquence de celui-ci ne dépasse pas $\pm 5\%$ de sa fréquence nominale, c'est-à-dire 38 MHz, qui est déterminée par les valeurs de la self-inductance 11 et de la capacité du condensateur 12.

Il ressort également de la Figure 2 que la sortie de l'oscillateur 13 est appliquée à des moyens de comptage de fréquence 14 reliés à des moyens de traitement de variation de fréquence 15 (soumis à un étalonnage ET [air-alcool]), eux-mêmes reliés à des moyens d'affichage 16 de la partie réelle ϵ' de la permittivité électrique du sol.

Le circuit oscillateur 13 précité est conçu, de manière optimisée, pour procurer une mesure linéarisée de la partie réelle ϵ' de la permittivité électrique du sol ϵ_r , qui soit indépendante de la partie imaginaire ϵ'' de cette permittivité. A cet effet (voir en particulier Figures 4 et 6), le circuit oscillateur 13 comprend un élément actif 18 formant admittance $Y_{i,k}$ 18 dont une entrée est reliée à l'une 2 des électrodes et dont l'autre entrée est reliée à l'autre électrode 4, la self-inductance 11 et le condensateur 12 étant reliés, en parallèle, entre les deux entrées précitées de l'élément actif 18. La sortie de cette admittance 18 est reliée à l'une de ses deux entrées et à un circuit amplificateur 19 dont la sortie est appliquée à l'entrée d'un circuit détecteur 20 dont la sortie est elle-même appliquée à la première entrée d'un circuit comparateur 21 (élément OTA sur la Figure 6). La seconde entrée du comparateur 21 reçoit une consigne d'amplitude telle que ce comparateur délivre en sortie, un courant de polarisation I_0 appliqué à l'élément 18, ce courant de polarisation étant proportionnel à la partie réelle de l'admittance définie par l'élément de circuit actif 18. La tension V_1 aux bornes du circuit 18 est maintenue sensiblement constante tandis que la pulsation de coupure ω_1 du circuit 18 est dépendante de

ladite tension V_1 et du courant de polarisation I_0 du circuit actif 18.

Il ressort de la Figure 8 que la sortie du circuit amplificateur 19 précité est reliée, par l'intermédiaire de
5 moyens d'adaptation qui comprennent un circuit d'adaptation d'impédance de sortie 22 relié par l'intermédiaire d'un câble coaxial 23 à un circuit d'adaptation d'impédance d'entrée 24 lui-même relié à un circuit d'adaptation de fréquence 24_a, à des moyens d'affichage de la partie réelle ϵ'
10 de la permittivité ϵ_r du sol qui forme permimètre. Ces moyens d'affichage sont avantageusement étalonnés, sur la base de mesures dans l'air et l'éthanol, pour s'affranchir de la capacité parasite introduite par la sonde elle-même.

Comme cela a déjà été mentionné précédemment, la
15 connaissance de la permittivité électrique d'un sol entraîne la nécessité de mesurer facilement la partie réelle ϵ' de cette dernière en éliminant sa partie imaginaire ϵ'' . Le circuit oscillateur haute-fréquence 13 précité a été conçu et mis en oeuvre pour supprimer l'effet de ϵ'' (effet de la
20 conductance du sol) sur la fréquence de celui-ci. Un asservissement I_0 au sein même de la sonde permet d'éliminer cette source d'erreur. Une optimisation du circuit oscillateur 13 permet la réalisation d'une sonde fidèle, de faibles dimensions et reproductible ainsi que de précision satisfai-
25 sante.

Quelques chercheurs ont déjà utilisé la corrélation entre la partie réelle de la permittivité relative du sol et la teneur en eau de ce sol. Les premières approches ont été réalisées à l'aide de ponts d'impédance (capteurs
30 passifs) jusqu'à des fréquences de l'ordre de 25 MHz. G. Les résultats obtenus montrent une corrélation entre teneur en eau et capacité pour une géométrie d'électrodes déterminée. D'autres chercheurs se sont orientés vers des capteurs actifs (source haute fréquence incorporée au sein du
35 capteur). Dans ce cas également, une corrélation apparaît

entre la teneur en eau et la fréquence de l'oscillateur exprimée en Hz.

Malheureusement, les résultats précités, exprimés en farad ou en Hertz, sont difficilement transposables en grandeur universelle caractérisant le comportement électrique du sol (permittivité). Ainsi l'exploitation et la synthèse des données bibliographiques disponibles est délicate, voire impossible. La présente invention a ainsi également permis de préciser le comportement électrique des sols dans un domaine de fréquence où la technologie permet la réalisation de capteurs fidèles et peu coûteux (gamme de fréquences de 10 à 100 MHz). Lors de la mise au point de l'invention, une étude détaillée des contraintes imposées par la nature des phénomènes électriques dans le sol, a permis d'éliminer les sources d'erreurs liées au principe même de la méthode mise en oeuvre.

Le sol est un milieu diélectrique composé de molécules libres ou liées plus ou moins polaires. Depuis les travaux de DEBYE (1929), on peut exprimer la permittivité relative ϵ_r , pour une molécule polaire, par un modèle simple:

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} = (j\sqrt{-1}) \quad (1)$$

où ϵ_s et ϵ_∞ sont les permittivités relatives (réelles) pour, respectivement une pulsation nulle et infinie, ω est la pulsation ($2\pi f$) du champ électrique d'excitation (ici créé par le capteur actif), et τ est le temps de relaxation de la molécule (inverse de la pulsation critique).

On rencontre ce modèle sous une autre forme, exprimée en séparant la partie réelle et la partie imaginaire de (1).

$$\epsilon_r(\omega) = \frac{\epsilon_s + \omega^2 \tau^2 \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - j\omega\tau \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} =$$

$$\epsilon'(\omega) - j\omega\epsilon''(\omega) \quad (2)$$

Les comportements de ϵ' et ϵ'' en fonction de ω sont illustrés respectivement par les spectres de dispersion et d'absorption des Figures 3A et 3B.

Dans la gamme des fréquences utilisée par la méthode capacitive (10 à 100 MHz), les spectres se compliquent du fait de la présence de plusieurs constituants et de l'apparition de mécanismes interfaciaux entre ces constituants (domaine de polarisation interfaciale dit de Maxwell WAGNER).

Les modèles de permittivité de sol prennent en compte quatre constituants qui sont: l'eau libre ($\epsilon' \sim 79$), l'eau liée ($\epsilon' \sim 3$ à 4), la fraction minérale ($\epsilon' \sim 2$ à 7) et l'air ($\epsilon' = 1$). Puisque l'eau libre présente une permittivité réelle ϵ' très contrastée par rapport aux autres constituants (jusqu'à 10 GHz), la corrélation entre teneur en eau volumique (Hv) et ϵ' est accessible aisément. Par contre, pour la partie imaginaire ϵ'' , la corrélation est très mal connue à cause du double déplacement vertical et horizontal du spectre d'absorption en fonction de Hv (Hv agit simultanément sur τ et ϵ_s).

Si on considère une paire d'électrodes plongées dans un tel milieu et excitées à la pulsation ω , on obtient le schéma électrique correspondant à l'admittance $Y_{cap}(\omega)$ d'une capacité avec perte:

$$Y_{cap}(\omega) = j\omega K \epsilon_0 \epsilon_r(\omega) = j\omega K \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'') \quad (3)$$

où ϵ_0 = permittivité absolue du vide ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m), K est la longueur d'influence du condensateur, ou sa sensibilité linéique, qui caractérise la géométrie des électrodes (unités en m) (Figure 3).

Le terme intéressant est (Figures 3 et 7) C_{cap} car

lié seulement à ϵ' , mais, par contre, le terme g_{cap} (conductance) doit être considéré comme parasite car lié à ϵ'' et donc non corrélé de manière connue à la teneur en eau Hv.

L'optimisation de la sonde a donc pour objet essentiel la réjection de l'effet de g_{cap} (ou ϵ'') sur la mesure de C_{cap} (ou ϵ'). C'est là la principale source d'erreur liée à la méthode capacitive active.

Il convient maintenant d'étudier quel est l'effet de g_{cap} sur un modèle général d'oscillateur.

Les caractéristiques essentielles que doit présenter l'oscillateur 13 sont essentiellement: encombrement très faible, dérive thermique et vieillissement négligeables, absence de réglage et reproductibilité des caractéristiques, fonctionnement normal même dans les sols à très forte conductance ($\epsilon'' = 40$) et étalonnage simple. Ceci conduit à un choix de composant à forte transconductance en haute fréquence, à la suppression des couplages magnétiques et des éléments à ferrite. Un bon comportement thermique conduit à la structure différentielle prédécrite, alimentée en courant (I_0). L'apparition d'une résonance parallèle impose la description de l'ensemble électrodes plus capteur en admittance (Y_{ik}).

Le composant actif 18 qui assure le maintien des oscillations est donc décrit par 4 paramètres complexes en admittance:

$$Y_{ik}(\omega, I_0) = g_{ik}(\omega, I_0) + jb_{ik}(\omega, I_0)$$

où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation de l'oscillateur et I_0 son courant moyen de polarisation, qui fixe principalement les g_{ik} .

L'absence de couplage magnétique impose un retour unitaire entre entrée et sortie de l'élément actif 18. On arrive ainsi au schéma de principe de la Figure 4.

En baptisant Y_L l'admittance totale des composants passifs et notant $C = C_0 + C_{cap}$ (on montrera plus loin la nécessité de faire $C_0 \gg C_{cap}$), on obtient:

$$Y_L = g_{cap} + j(C\omega - \frac{1}{L\omega}) = g_{cap} + j b_L;$$

en remarquant que $i_L = -(i_1 + i_2) = Y_L V_2$, on obtient:

$$5 \quad \frac{V_2}{V_1} = - \frac{Y_{11} + Y_{21}}{Y_L + Y_{12} + Y_{22}} = - \frac{g' + j b'}{g + j b'}$$

La condition $C_0 \gg C_{cap}$ assure également un coefficient de surtension $Q = \frac{C\omega}{g_{cap}}$ grand devant 1 ce qui garantit une forme sinusoïdale pour i_1 et i_2 bien que les courants soient de forme carrée. Ainsi, les notations i_1 et i_2 représentent la composante fondamentale des courants entrant dans Y_{ik} .

Dans ces conditions, l'oscillation est obtenue pour $\frac{V_2}{V_1} = 1 + j0 = 1$,

ce qui entraîne:

$$15 \quad g + g' = 0 \quad (4) \quad \text{et} \quad b + b' = 0 \quad (5)$$

$$(où \quad b = C\omega - \frac{1}{L\omega} + b_{12} + b_{22})$$

C'est donc l'équation (5) qui fournit la pulsation d'oscillation et sous cette forme, on ne voit aucun lien entre g (donc g_{cap}) et la pulsation. Ceci est en contradiction avec la bibliographie et les essais réalisés avec plusieurs structures d'oscillateur. C'est la preuve qu'une description aussi simpliste ne suffit pas.

25 En effet, pour la structure choisie, on assiste à une forte dépendance des paramètres g_{11} et g_{21} avec l'amplitude de la tension d'entrée $|V_1|$, ce qui suggère un modèle simple reliant simultanément g_{11} et g_{21} à $|V_1|$ pour les fréquences faibles:

$$30 \quad g' = g_{11} + g_{21} = - \frac{I_0}{|V_1| + \phi}$$

où ϕ est un potentiel caractéristique de la structure intégrée, de l'ordre de 0,1 V pour le silicium (Figure 5).

$$(\phi \approx 4 \text{ à } 6 V_T \text{ avec } \frac{k T_0}{e} = 25 \text{ mV à } 300^\circ \text{ K})$$

A plus haute fréquence, on propose une évolution classique de type passe-bas premier ordre:

$$g' + jb' = \frac{-I_0}{|V_1| + \varphi} \times \frac{\omega_1}{\omega_1 + \delta\omega}$$

5 où ω_1 = pulsation de "coupure" du composant actif 18, qui en séparant parties réelle et imaginaire, devient:

$$g' + jb' = \frac{-I_0}{|V_1| + \varphi} \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 + \omega^2} \left(1 - j \frac{\omega}{\omega_1}\right)$$

où apparaît l'argument:

$$10 \quad \text{tg } \varphi = \frac{b'}{g'} = -\frac{\omega}{\omega_1}$$

Des essais sur des structures intégrées (différentiels à large bande) ont montré une quasi indépendance de ω_1 avec $|V_1|$ et une proportionnalité entre ω_1 et le courant de polarisation I_0 .

En réécrivant les équations (4) et (5), on obtient:

$$g + g' = g - \frac{I_0}{|V_1| + \varphi} \cdot \frac{\omega_1 \cdot (I_0)}{\omega_1^2 (I_0) + \omega^2} = 0 \quad (6)$$

$$20 \quad b + b' = b + \frac{I_0}{|V_1| + \varphi} \cdot \frac{\omega_1 \cdot (I_0)}{\omega_1^2 (I_0) + \omega^2} = 0 \quad (7)$$

L'équation (6) montre le lien entre les pertes de conductance g et l'amplitude de V_1 .

L'équation (7) montre le lien entre la pulsation de l'oscillateur, terme b , et V_1 , donc la conductance.

En explicitant (7), on obtient:

$$b + g \frac{\omega}{\omega_1} = 0 \quad (8)$$

30 En détaillant maintenant à partir des éléments du schéma:

$$b = C \omega - \frac{1}{L \omega} + b_{12} + b_{22}$$

35 où b_{12} et b_{22} sont les termes réactifs (capacitifs) parasi-

tes du semi-conducteur 18 qui sont fortement dépendants de l'excursion de tension $|V_1|$.

On peut aisément introduire l'écart de pulsation de l'oscillateur 13 par rapport à la pulsation idéale

$$5 \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} ;$$

en posant $\Delta \omega = \omega - \omega_0 \ll \omega_0$,

$b = 2C\Delta\omega + b_{12}(|V_1|) + b_{22}(|V_1|)$, on obtient l'expression du glissement de pulsation par rapport à la pulsation théo-

10 rique ω_0 .

$$\Delta \omega(g) = \omega(g) - \omega_0 = \frac{-1}{2C} \left[g \frac{\omega}{\omega l(l_0)} + b_{12}(|V_1|) + b_{22}(|V_1|) \right] (9)$$

dans laquelle apparaît l'effet des pertes par conductance, l'effet de V_1 et l'effet de l_0 . Pour éliminer cette erreur systématique, on peut tenter de maintenir $\Delta \omega(g)$ indépendant de g . Ceci impose de maîtriser les termes réactifs capaci-

20 $\frac{g}{\omega l(l_0)}$ constant.

On introduit donc un asservissement qui assure la proportionnalité de l_0 aux pertes g en maintenant $|V_1|$ constant (équation (6)). On en déduit le schéma de principe de l'oscillateur (Figure 6).

On peut remarquer que l'équation (9) incite à choisir un composant à fort ω_1 et à travailler avec C le plus grand possible compatible avec la sensibilité souhaitée. De plus l'équation (6) montre que l'on dispose d'une image de g par la grandeur l_0 , pour autant que l'on maintienne $|V_1|$ constant.

En pratique, l'écart de fréquence relatif dû aux pertes par conductance se limite à 100 KHz pour une fréquence de 38 MHz soit $2,5 \cdot 10^{-3}$ (confirmé sur un prototype et deux réalisations), pour autant que les pertes g restent in-

35

férieures à 5 m S (ou 200 Ω).

Un oscillateur non optimisé donne une sensibilité à g (ou à ϵ'') dix fois supérieure. Ceci confirme l'efficacité du maintien de l'amplitude VI.

5 Maintenant que le capteur est quasi-insensible à ϵ'' , il faut spécifier sa sensibilité vis-à-vis de ϵ' (seul terme utile pour la teneur en eau). On a vu que C_{cap} est lié à ϵ' (Figure 3) et il faut donc apprécier le plus fidèlement possible la seule variation de capacité due à l'effet du sol. On adopte pour cela une configuration à deux états suc-

10 cessifs qui fournit ω_0 ou ω_{cap} (Figure 7).

Et en posant $\omega_0 = \omega_{cap} + \Delta\omega$, on obtient:

$$2 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2$$

15
$$\frac{C_{cap}}{C_0} = \frac{1}{1 - 2 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} + \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2} \quad (10)$$

Un traitement simple des fréquences incite à res-

20 ter dans le domaine voisin de la loi idéale $\frac{C_{cap}}{C_0} = 2 \frac{\omega}{\omega_0}$ pour $\Delta\omega \ll \omega_0$.

En se limitant à une variation de fréquence relative $\frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ inférieure à $5 \cdot 10^{-2}$, on obtient une linéarité

25 moyenne meilleure que $\pm 2\%$. Ceci conduit pour $\epsilon' = 40$ et $Hv = 0,4$, à $C_{cap} \ll 0,1 C_0$. Cette condition va dans le sens de l'élimination de l'effet de g sur $\Delta\omega$ (équation (9)).

La sensibilité des électrodes 2, 4 ou longueur

30 d'influence K est uniquement dictée par l'obligation de maintenir g_{cap} inférieur à 5 m ν pour assurer un bon fonctionnement de l'asservissement par I_0 .

On a l'inégalité $g_{cap} = \omega K \epsilon_0 \epsilon'' \max \leq 5 \text{ m } \nu$ (11), d'où $K \ll 56 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (aux alentours de 40 MHz).

35 Ayant fixé K, alors $C_{cap} \max$ l' est aussi,

c'est-à-dire:

$C_{cap\ max} = K \epsilon_0 \epsilon'_{\ max}$ avec $\epsilon'_{\ max} = 40$ pour une teneur volumique de 0,4. On obtient ainsi $C_{cap\ max} = 20\ pF$ et bien entendu $C_0 = 200\ pF$ et $L \approx 130\ nH$.

5 Tous les éléments de l'oscillateur 13 sont ainsi optimisés pour satisfaire une mesure linéarisée de ϵ' tout en restant indépendant de la partie imaginaire ϵ'' .

L'ensemble de l'électronique 8 de la sonde est entièrement moulé dans une résine dure à faible retrait, faible ϵ' et faible ϵ'' , les éléments électroniques en aval du câble 23 étant à l'extérieur de ladite sonde.

Les composants réactifs 11, 12 (L et C) ont fait l'objet d'une étude de stabilité thermique qui a abouti à une stabilité et une reproductibilité très satisfaisante.

15 Pour le traitement et l'affichage de ϵ' , on utilise une méthode de comparaison de fréquence, correspondant à la présence ou non de l'effet du sol (Figure 7). On s'affranchit ainsi du vieillissement, de la température et de la dispersion de la fréquence nominale de la sonde.

20 Finalement ϵ' s'obtient à partir de la formule:

$$\epsilon' = \frac{2 C_0}{\epsilon_0 K} \cdot \frac{\omega_0 - \omega_{cap}}{\omega_0} = \frac{2 C_0}{\epsilon_0 K} \cdot \frac{f_0 - f_{cap}}{f_0}$$

On obtient une image de $f_0 - f_{cap}$ en procédant d'abord à un comptage pendant τ_m avec la configuration sans C_{cap} , puis à un décomptage pendant τ_m avec C_{cap} présent. Le registre mémoire 25 (Figure 8) contient au bout du cycle de mesure:

$$\epsilon' = \frac{2 C_0}{\epsilon_0 K} \cdot \frac{N_0 - N_{cap}}{N_0}$$

30 avec $\frac{N_0 - N_{cap}}{N_{cap}} = \frac{\tau_m}{D} \cdot \frac{f_0 - f_{cap}}{f_0}$

où D est le taux de division, par l'élément 24a, de la fréquence issue du capteur pour la rendre compatible avec la technologie du traitement (C MOS en LSI) (D = 80).

35 L'écart relatif de fréquence à pleine échelle

($\epsilon' = 40$) étant limité à $5 \cdot 10^{-2}$, et cette pleine échelle étant souhaitée sur 3 chiffres ($\epsilon' = 40,0$), la capacité du registre 25 doit être de 4 chiffres décimaux (codage en BCD). Le cycle complet de traitement se répète environ toutes les 2 secondes.

Le traitement doit assurer aussi une correction de la capacité parasite C_p prise en compte en même temps que le sol: en effet, une fraction du volume du capteur lui-même est soumis à l'influence des électrodes. Il faut donc re-
 10 trancher C_p de façon à afficher $\epsilon' = 1$ dans l'air (par exemple). On réalise l'opération par un prépositionnement négatif du registre 25 au début de chaque cycle de mesure. Bien entendu l'élément parasite C_p doit être constant et
 15 faible. Une optimisation de la forme intérieure du capteur a permis de le diminuer. On obtient ainsi le schéma synoptique du capteur et du permimètre de la Figure 8.

Pour l'étalonnage de la sonde qui est linéaire (non linéarité indécélable), il suffit de deux milieux fluides et homogènes de permittivité connue, c'est-à-dire
 20 l'éthanol et l'air (éthanol à 20°C: $\epsilon' = 25$, air: $\epsilon' = 1$). A l'intérieur du permimètre, on dispose d'un ensemble de clés binaires (3 chiffres codés en B C D) qui fixe la durée de mesure τ_m (Figure 8). Pour régler τ_m , on positionne le permimètre en comptage seul, capteur dans l'air (lecture N_1)
 25 puis dans l'éthanol (lecture N_2). On note $N_1 - N_2$ et par une règle de proportionnalité, on corrige τ_m pour obtenir $N_1 - N_2 = 24$.

Un deuxième jeu de clés binaires permet d'agir sur le prépositionnement (correction de C_p) en mode automatique
 30 pour lire 1 dans l'air.

Dans la sonde conforme à l'invention, la dérive thermique mesurée sur la fréquence nominale est égale à 1,4 kHz par °C au plus, soit 3,5 ppm par °C dans une plage de températures de 0 à 45°C. Cette dérive thermique passe
 35 totalement inaperçue lors de l'affichage de ϵ' grâce à la

méthode de comparaison de fréquence.

Comme déjà indiqué précédemment, la liaison entre le capteur proprement dit et le permimètre est réalisée (voir Figure 8) par un câble adapté basse impédance 23 dont la longueur peut être quelconque. Par ailleurs, selon une caractéristique préférentielle de l'invention, la sonde de la Figure 1 est entièrement recouverte d'un film dur de résine polyuréthane d'environ 0,2 mm d'épaisseur. Grâce à ce film, on évite la corrosion des électrodes et les effets de pile dans le sol humide. De ce fait, les électrodes 2 et 4 de la sonde sont enserrées avec une forte capacité qui conduit à une diminution d'environ 2% de la sensibilité linéique K de la sonde. Bien entendu, on procède à l'étalonnage de la sonde après stabilisation du film.

Pour tester la sonde conforme à l'invention, deux groupes de mesures ont été effectués l'un pour vérifier la linéarité de l'affichage de ϵ' et le second pour vérifier l'indépendance de l'affichage vis-à-vis de la conductance du sol. Devant la difficulté de réunir un ensemble de liquides de permittivité connue dans une gamme de valeurs de ϵ' comprises entre 1 et 40, la simulation de ϵ' a été réalisée par des capacités et les pertes dues à ϵ'' ont été simulées par des résistances. Les capacités d'essais ou de test sont des éléments céramique à faibles pertes en haute fréquence dont la valeur exacte à 40 MHz a été déterminée en utilisant un Q mètre. Le graphe de la Figure 8E ainsi obtenu ($K = 64.10^{-2}m$) ne permet pas de déceler de non linéarité jusqu'à $\epsilon' = 35$. Ce défaut apparaît sensiblement vers $\epsilon' = 45$ (erreur par défaut de - 10 2%). En ce qui concerne l'effet des pertes par conductance, le graphe de la Figure 8F qui relie la valeur de ϵ' affichée à la valeur de C, ceci pour différentes valeurs de g_{cap} (l'inverse de la résistance extérieure), montre une erreur maximale de + 1,3. Cette erreur est obtenue pour une conductance d'environ 2 mV qui correspond à une partie imaginaire $\epsilon'' = 17$ (obtenue pour

des sols à forte teneur en eau). On peut raisonnablement estimer que cet écart de 1,3 intervient lorsque le permimètre associé à la sonde selon l'invention travaille dans des conditions d'extrême humidité. Il convient finalement de noter que l'arrêt de l'oscillateur 13 se produit pour une perte extérieure équivalente à 120 ohms qui n'a jamais été enregistrée pendant les essais de caractérisation de la sonde, sur échantillons de sol. Si nécessaire, la sonde peut être également associée à un indicateur analogique de conductance qui peut s'avérer très utile pour des essais sur des sols chargés en ions.

La sonde de mesure directe de ϵ' conforme à l'invention, paramètre corrélé à la teneur en eau, procure une facilité et une rapidité jamais atteintes pour l'étude diélectrique des sols dans un domaine de fréquence où la bibliographie demande à être développée.

Selon une forme de réalisation pratique de l'invention, la sonde conforme à l'invention comprend une électrode annulaire 2 de hauteur égale à 8 mm et de diamètre égal à 20 mm et une électrode en pointe de pénétration 4 de diamètre égal à 3 mm et de longueur égale à 27 mm, qui est disposée à l'extrémité cylindrique de la sonde. Cette conformation particulière préserve la facilité d'implantation des sondes de type monoaxial tout en permettant d'explorer un volume de matériau non perturbé plus important que celui déterminé sur des réalisations monoaxiales classiques. L'intérêt de la sonde conforme à l'invention réside également dans le fait qu'une fois mise en place dans le matériau à étudier, il permet l'enregistrement automatique d'informations en continu. L'invention prévoit un séjour long dans le sol de la sonde sans que celle-ci se dégrade physiquement, en particulier par corrosion des électrodes sous l'effet d'agents divers contenus dans la solution du sol. C'est pourquoi, en particulier, les électrodes de la sonde ont été réalisées en des matériaux de nature chimique

identique et de sorte qu'aucune composante continue du courant ne circule entre celles-ci.

Pour des raisons d'ordre physique, d'une part, et pratique de l'autre, on choisit délibérément de corrélérer 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.

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

15

$$\text{On a la relation: } \theta = W * \rho_d / \rho_w$$

avec

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

20

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

Pour établir chaque point expérimental, on mesure donc:

25

- la permittivité de l'échantillon,
- sa teneur en eau pondérale, obtenue par pesées,
- sa masse volumique.

30

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

Une relation expérimentale a été établie en laboratoire entre ϵ et θ pour plusieurs types de sols.

35

Les courbes R_1, R_2, R_3, R_4 représentées sur la

Figure 12 et illustrant cette relation expérimentale correspondant, respectivement, à des mesures effectuées:

- sur des échantillons de sol limono-argileux pour R_1 ,
- sur des échantillons de sol sablo-argileux pour R_2 ,
- sur des échantillons de sable pour R_3 ,
- sur des échantillons de sol argilo-limoneux pour R_4 .

On observe, à partir de ces données expérimentales, une linéarité de la réponse ϵ' en fonction de θ , pour tous les domaines de teneur en eau explorés.

Le tableau I ci-dessous indique les paramètres de corrélation respectifs de ces différentes réalisations linéaires.

TABLEAU I

Nature du sol	A_0	A_1	r	e
Argilo-limoneux	16,69	30,57	0,998	0,30
Limoneux argileux	6,58	61,33	0,999	0,32
Sablo-argileux	9,19	54,71	0,996	0,43
Sable pur	4,12	54,63	0,999	0,4

Dans le Tableau I, A_1 est la pente de la courbe, A_0 la valeur extrapolée de la permittivité pour une teneur en eau nulle, r l'indice de corrélation, e l'erreur type d'estimation.

L'invention propose également avantageusement un procédé d'optimisation des dimensions de la sonde ci-dessus décrite et de la forme du volume de matériau pris en compte par la mesure réalisée au moyen de celle-ci, qui comprend
5 les étapes suivantes:

On introduit (voir Figure 9) la sonde ou le capteur 1 dans un liquide de propriétés diélectriques connues (ici de l'alcool au comportement diélectrique proche de celui d'un sol humide), contenu dans un récipient 30 de grande
10 dimension. La proximité de l'air introduit une erreur sur la mesure des propriétés diélectriques du liquide de permittivité diélectrique E.

Le barycentre B du volume de mesure est défini de la manière suivante: lorsque ce barycentre B est inscrit
15 dans le plan formé par la surface du liquide, on mesure une permittivité $E=13$ égale à la moyenne de celle de l'alcool $E=25$ et de l'air $E=1$. Lorsque la distance surface-barycentre augmente, la permittivité mesurée augmente pour tendre vers celle de l'alcool. On détermine alors une relation expérimentale entre le complément à 1 de l'erreur relative sur la
20 permittivité de l'alcool ($1 - \Delta E/E$) et la cote d'enfoncement z du capteur (voir Figure 10 qui représente la cote d'enfoncement z du barycentre en fonction du complément à 1 de l'erreur pour différentes valeurs de l'angle A d'inclinaison par rapport à la surface du liquide).
25 L'opération précitée est répétée en disposant l'axe du capteur 1 selon des angles A (voir Figure 9) différents par rapport à la surface du liquide. On repère alors, sur les différentes courbes expérimentales ainsi obtenues, les cotes d'enfoncement correspondant à différents critères
30 d'erreur X, $X=0,75 - 0,80 - 0,90$ par exemple.

Pour chaque critère, on reporte ces distances sur des demi-droites ayant pour origine le barycentre B et formant un angle $A - \pi/2$ avec l'axe du capteur 1. Les points
35 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 diélectrique de l'alcool (voir Figure 11).

5 Pour la géométrie testée (voir Figure 1), on admet une symétrie de révolution de ces contours d'iso-influence. De cette manière, on délimite un volume de référence (pour le critère X choisi) tel qu'au-delà, la mesure sera au moins égale à $X \times E$ (alcool).

10 Il a ainsi été possible de comparer entre eux les volumes de mesure générés par différentes formes de sonde et de procéder à une optimisation géométrique. Globalement, l'extension des iso-contours à partir du barycentre B est la même pour les différents types de géométrie d'électrodes testés. La sonde de la Figure 1 a été retenue pour les rai-
15 sons suivantes:

- à l'intérieur du contour $X = 0,8$, qui constitue l'essentiel du volume de mesure, le volume effectif de sol est très nettement supérieur dans ce type de géométrie. Dans les autres types de géométrie monoaxiale testés, la partie
20 la plus importante du volume de référence est occupée par la sonde. Dans ce cas, le volume effectif de sol est alors très restreint et localisé à la stricte périphérie de celle-ci.

- la résolution de la mesure souhaitée est atteinte, soit environ 25 mm de hauteur. La possibilité d'observer
25 des phénomènes très localisés à la surface du sol est en particulier garantie.

- avec ce type de géométrie, on peut facilement réaliser une cavité dont la forme épouse parfaitement celle du corps de capteur, au moyen d'une tarière adaptée. On ad-
30 met que l'enfoncement en force de l'électrode de pénétration 4 n'occasionne que des perturbations négligeables du matériau. Par ailleurs, les perturbations du matériau occasionnées lors de la réalisation de l'avant-trou ne sont ja-
35 d'actions de lissage au passage de la tarière. Dans

l'invention, le volume de matériau soumis à la mesure est reporté pour l'essentiel hors du volume perturbé.

Une telle sonde capacitive a déjà été utilisée pour l'évaluation sur le terrain de teneurs en eau d'un
5 sol.

Une telle évaluation n'est, bien entendu, possible qu'avec la détermination initiale de courbes d'étalonnage reliant localement permittivité et teneur en eau, par exemple teneur en eau volumique. Ces courbes d'étalonnage peuvent, notamment, être obtenues en corrélant préalablement
10 des mesures de permittivité à des mesures des teneurs en eau volumiques calculées à partir de mesures de teneur en eau pondérale et de masse volumique, ces mesures étant effectuées simultanément aux mesures permittives par la méthode
15 classique gravimétrique et à l'aide d'un gamma-densimètre de terrain.

A titre d'exemple, on donne à la Figure 13 les droites de corrélation ainsi déterminées, sur un site de loess homogène; ces droites référencées respectivement par
20 S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 correspondent respectivement à des mesures réalisées à des profondeurs:

- de 2,5 cm pour S_1 ,
- de 5,5 cm pour S_2 ,
- de 8,5 cm pour S_3 ,
- 25 - de 12,5 cm pour S_4 ,
- de 17,5 cm pour S_5 ,

Le Tableau II ci-dessous donne les paramètres de corrélation respectifs obtenus à ces différentes profondeurs.

TABLEAU II

Profondeur	A_0	A_1	r	e
2,5 cm	3,99	38,36	0,948	0,75
2,5 cm	4,87	34,46	0,945	0,61
8,5 cm	3,92	39,38	0,893	0,93
12,5 cm	6,64	39,52	0,910	0,66
17,5cm	6,13	39,65	0,941	0,57

Les symboles A_0 , A_1 , r et e ont la même signification qu'au Tableau I ci-dessus.

A titre d'exemple encore, on a représenté sur les Figures 14 et 15 les évolutions respectives en fonction du temps de mesures de permittivité et de mesures de teneur en eau obtenues par la méthode classique gravimétrique, sur un même site argilo-limoneux, à des profondeurs respectives de:

- 5 cm pour T_{p1} et T_{g1}
- 10 cm pour T_{p2} et T_{g2}
- 15 cm pour T_{p3} et T_{g3}
- 20 cm pour T_{p4} et T_{g4}

Le terrain du site a été préalablement humidifié. On remarquera que les évolutions en tendance sont tout à fait cohérentes. Il faut noter, cependant, que les permittivités ici utilisées sont des permittivités normalisées pour tenir
5 compte des variations de permittivité en fonctions des températures de mesure.

D'autres méthodes d'étalonnage sont aussi possibles et notamment des méthodes d'étalonnages par modélisation. De telles modélisations sont, néanmoins, à
10 l'heure actuelle très peu fiables, notamment pour des mesures sur le terrain.

En conclusion, la sonde conforme à l'invention fournit une mesure précise de la permittivité diélectrique d'un sol. Les résultats obtenus lors de nombreux essais sur
15 sol en laboratoire font apparaître des erreurs type d'estimation (avec un écart type résiduel par rapport aux valeurs observées et un écart résiduel par rapport aux valeurs théoriques) de l'ordre de 0,3 point de permittivité. Le circuit électronique de mesure 8 est très peu sensible à
20 la température. La stabilité de la réponse de la sonde est vérifiée en ce qui concerne les temps d'utilisation des essais au laboratoire et au champ. La réjection de la composante imaginaire de la permittivité est effective dans les limites prévues. A titre d'ordre de grandeur, les conductan-
25 ces observées sur les essais de terrain sont de l'ordre de 2 à 3 mS et atteignent rarement 4 mS dans des conditions très humides. 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
30 implantation simple et peu perturbatrice de la sonde.

Les signes de référence insérés après les caractéristiques techniques mentionnées dans les revendications, ont pour seul but de faciliter la compréhension de ces dernières, et n'en limitent aucunement la portée.

REVENDEICATIONS

1. Sonde capacitive pour la mesure in situ de la teneur en eau d'un sol, comprenant deux électrodes coaxiales (2, 4) électriquement reliées à des moyens de mesure (8) placés dans un corps de sonde (1) et susceptibles d'être enfoncées dans le sol, caractérisée en ce que le corps de sonde (1) a une forme cylindrique et est susceptible d'être enfoncé dans une cavité de même forme préalablement forée, que la première électrode (2) constitue une extension cylindrique de l'extrémité dudit corps (1) tournée vers le sol et que la seconde électrode (4) constitue une pointe de pénétration dans le sol, fixée sur la même extrémité du corps (1), dans le prolongement de ce dernier, ladite pointe étant séparée de la première électrode (2) par un isolant (3).

2. Sonde capacitive selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'isolant (3) forme un bouchon annulaire ayant une résistance mécanique suffisante pour supporter la pointe de pénétration (4).

3. Sonde selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisée en ce que le bouchon (3) est en polyamide.

4. Sonde selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que le bouchon (3) comprend une saillie annulaire axiale (6a) qui s'étend à l'intérieur du corps de sonde (1) et qui entoure l'extrémité de l'électrode de pénétration (4) noyée dans le corps (1), ainsi qu'une collerette périphérique (6b) contre laquelle est fixée l'électrode d'extrémité (2).

5. Sonde selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que les électrodes (2, 4) sont en acier inoxydable et en ce que l'électrode de pénétration (4) est reliée par vissage à un élément (5) en acier doux de raccordement électrique auxdits moyens électroniques de mesure (8).

6. Sonde selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que le corps de sonde (1) est rempli

d'une matière isolante dans laquelle sont noyés les moyens de mesure (8).

5 7. Sonde selon la revendication 6, caractérisée en ce que la matière remplissant le corps (1) est une résine époxyde dont la température de polymérisation est inférieure ou égale à 50°C.

8. Sonde selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que la surface intérieure du corps de sonde (1) comporte un revêtement métallique destiné à protéger les moyens électroniques de mesure de tous para-
10 sites liés à l'environnement électrique.

9. Sonde selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que la surface extérieure des élec-
trodes (2, 4) présente des aspérités destinées à améliorer le contact de ces électrodes (2, 4) avec le sol et
15 l'émission du champ électrique.

10. Sonde selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que la paroi du corps de sonde est en PVC et en ce qu'elle est prolongée, du côté opposé aux
électrodes (2, 4), par un manchon (6) en PVC formant moyen
20 de prolongation du corps de sonde (1).

11. Sonde selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que les moyens électroniques de me-
sure de la sonde comprennent un commutateur d'isolation (10)
dont une borne est reliée à l'une (4) des électrodes (2, 4)
25 et dont l'autre borne est reliée à une première borne d'une self-inductance (11), à une première borne d'un condensateur (12) et à une première entrée d'un circuit oscillateur (13)
dont une autre entrée est également reliée à la seconde bor-
ne du condensateur (12), à la seconde borne de la self-
30 inductance (11) et à l'autre électrode (2), lesdits moyens électroniques de mesure de la sonde étant conçus pour mesurer les variations de fréquence de résonance du circuit oscillateur (13) induites par la valeur de la capacité in-
troduite lors de l'introduction de la sonde dans le sol.

35 12. Sonde selon la revendication 11, caractérisée

en ce que le commutateur (10) est conçu pour être actionné à une fréquence de 0,5 Hz en vue d'isoler les électrodes (2, 4) à chaque période de commutation, de sorte que deux mesures de fréquence sont effectuées, avec et sans prise en compte de la capacité du sol, et que la différence de fréquence obtenue est seulement fonction de la valeur de la capacité constituée par le système électrodes-sol.

13. Sonde selon l'une des revendications 11 ou 12, caractérisée en ce que le circuit oscillateur (13) est optimisé pour que l'excursion en fréquence de celui-ci ne dépasse pas $\pm 5\%$ de sa fréquence nominale qui est déterminée par les valeurs de la self-inductance (11) et de la capacité du condensateur (12).

14. Sonde selon l'une des revendications 11 à 14, caractérisée en ce que la sortie de l'oscillateur (13) est appliquée à un circuit de traitement extérieur comprenant des moyens de comptage de fréquence (14) reliés à des moyens de traitement de variation de fréquence (15), eux-mêmes reliés à des moyens d'affichage (16) de la partie réelle (ϵ') de la permittivité électrique du sol.

15. Sonde selon l'une des revendications 11 à 14, caractérisée en ce que le circuit oscillateur (13) est conçu, de manière optimisée, pour procurer une mesure linéarisée de la partie réelle (ϵ') de la permittivité électrique du sol, qui soit indépendante de la partie imaginaire (ϵ'') de cette permittivité.

16. Sonde selon l'une des revendications 11 à 15, caractérisée en ce que le circuit oscillateur (13) comprend un élément actif formant admittance (18) dont une entrée est reliée à l'une (2) des électrodes et dont l'autre entrée est reliée à l'autre électrode (4), la self-inductance (11) et le condensateur (12) étant reliés, en parallèle, entre les deux entrées précitées de l'élément actif (18) dont la sortie est reliée à l'une de ses deux entrées et à un circuit amplificateur (19), la sortie du circuit amplificateur (19) étant appliquée à l'entrée d'un circuit détecteur (20) dont

la sortie est appliquée à la première entrée d'un circuit comparateur (21), la seconde entrée du comparateur (21) recevant une consigne d'amplitude telle que ce comparateur (21) délivre, en sortie, un courant de polarisation (I_0) appliqué à l'élément actif (18), qui est proportionnel à la
5 partie réelle de l'admittance définie par l'élément actif (18), la tension (V_1) aux bornes du circuit (18) étant maintenue sensiblement constante, tandis que la pulsation de coupure du circuit (18) est dépendante de ladite tension (V_1) et du courant de polarisation (I_0) du circuit actif
10 (18).

17. Sonde selon la revendication 16, caractérisée en ce que la sortie du circuit amplificateur ((19) est reliée, par l'intermédiaire de moyens d'adaptation (22, 23, 24, 24a), à des moyens d'affichage de la partie réelle de la
15 permittivité du sol formant permimètre et étalonnés, sur la base de mesures dans l'air et l'éthanol, pour s'affranchir de la capacité parasite introduite par la sonde elle-même.

18. Sonde selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'elle est recouverte d'un film dur
20 de résine polyuréthane.

19. A titre de moyen constitutif de la sonde selon l'une des revendications précédentes, un oscillateur haute fréquence (13) de conception optimisée pour s'affranchir de la source d'erreur liée aux mesures capacitatives actives et
25 pour obtenir une mesure linéarisée de la partie réelle d'une permittivité diélectrique.

20. Procédé d'optimisation des dimensions de la sonde selon l'une des revendications 1 à 18, et de la forme du volume de matériau pris en compte par la mesure réalisée
30 au moyen de celle-ci, caractérisé par les étapes consistant à:

a - introduire la sonde dans un liquide de propriétés diélectriques connues, contenu dans un récipient de grandes dimensions,

35 b - le barycentre (B) du volume de mesure ayant

été défini, effectuer des mesures de permittivité pour différentes cotes (z) d'enfoncement de celui-ci dans le liquide,

c - établir une relation expérimentale entre le complément à 1 de l'erreur relative sur la permittivité du liquide et ladite cote d'enfoncement, du type

$$1 - \frac{\Delta E}{E} = f(z)$$

d - répéter les étapes b et c en disposant l'axe de la sonde selon plusieurs angles (A) formés avec la surface du liquide,

e - repérer sur les différentes courbes expérimentales déduites des mesures précitées, les distances correspondant à différents critères d'erreurs choisis selon l'équation

$$1 - \frac{\Delta E}{E} = x$$

f - pour chaque critère, reporter les distances précitées sur des demi-droites ayant pour origine le barycentre (B), et formant un angle $(A - \frac{\pi}{2})$ avec l'axe de la sonde,

g - relier entre eux les points d'égale erreur pour constituer des contours d'iso-erreur ou d'iso-influence de la proximité de l'air sur la mesure de la permittivité du liquide.

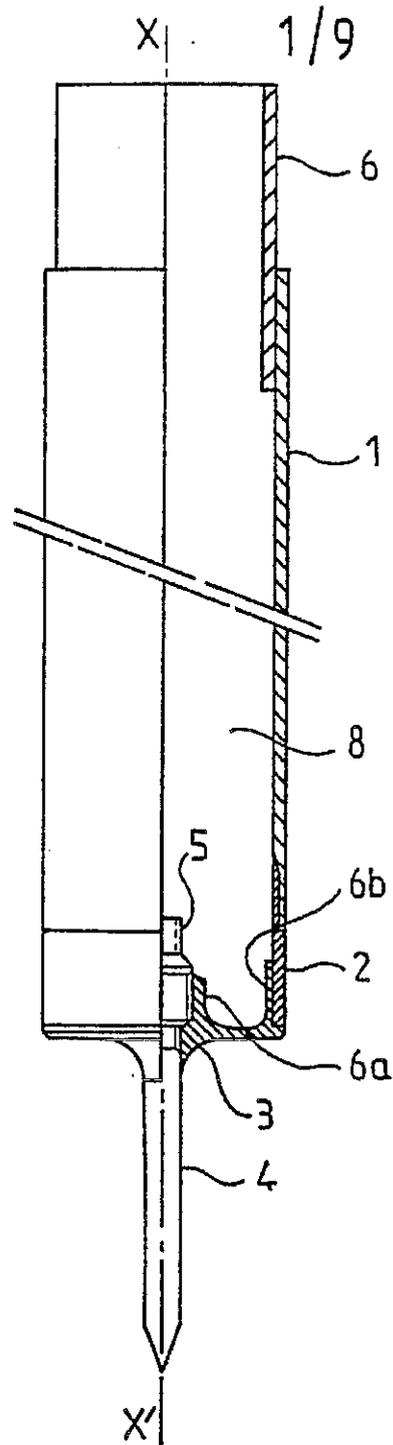


FIG. 1

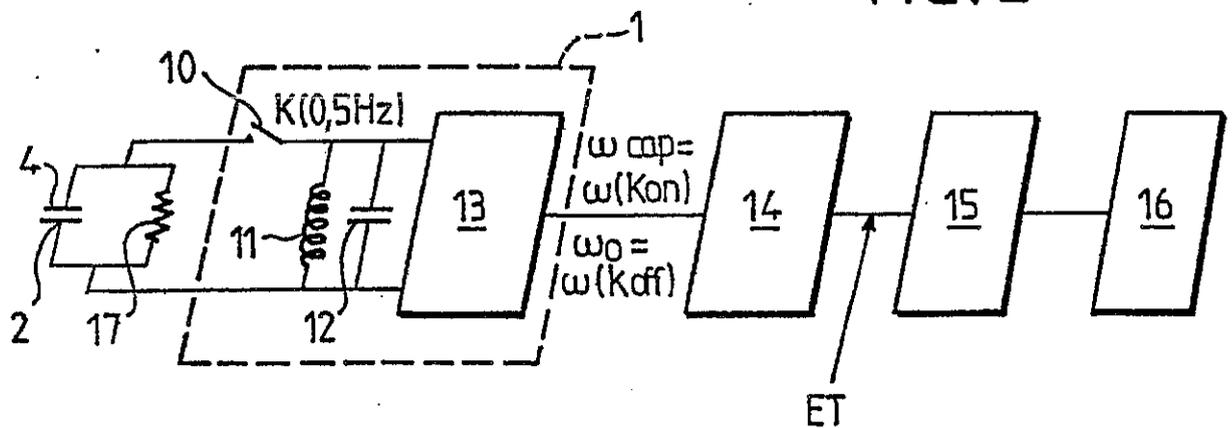


FIG. 2

2/9

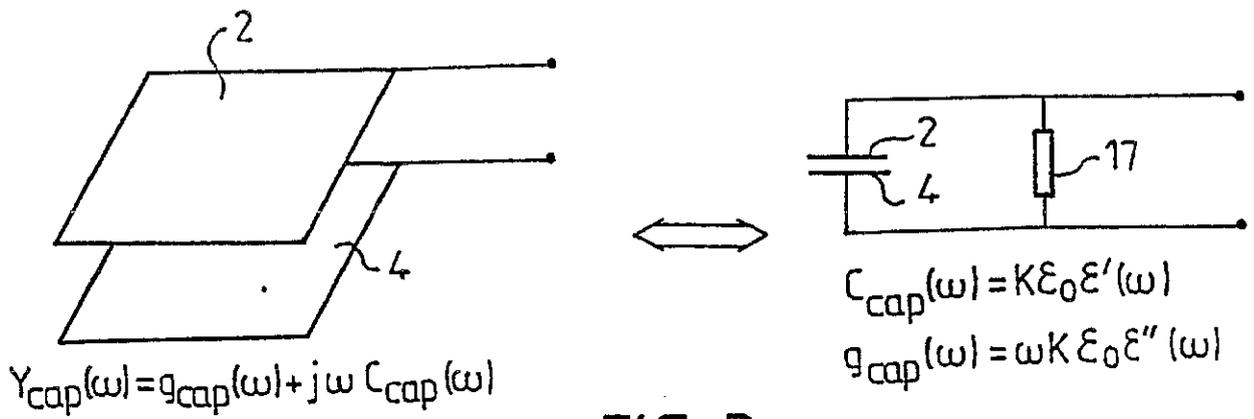


FIG. 3

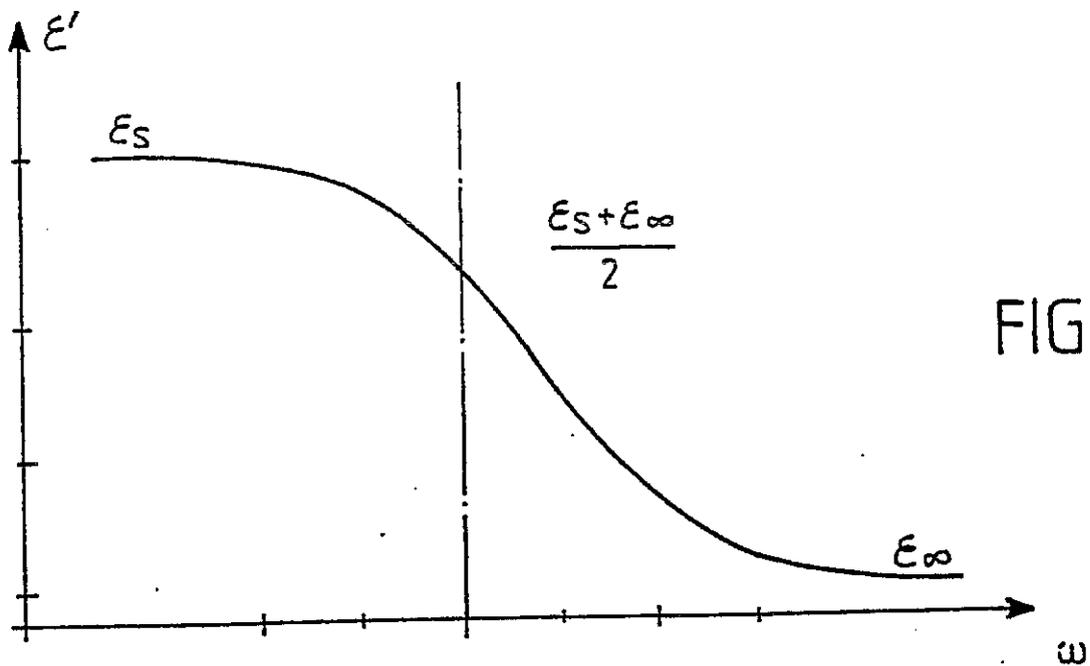


FIG. 3A

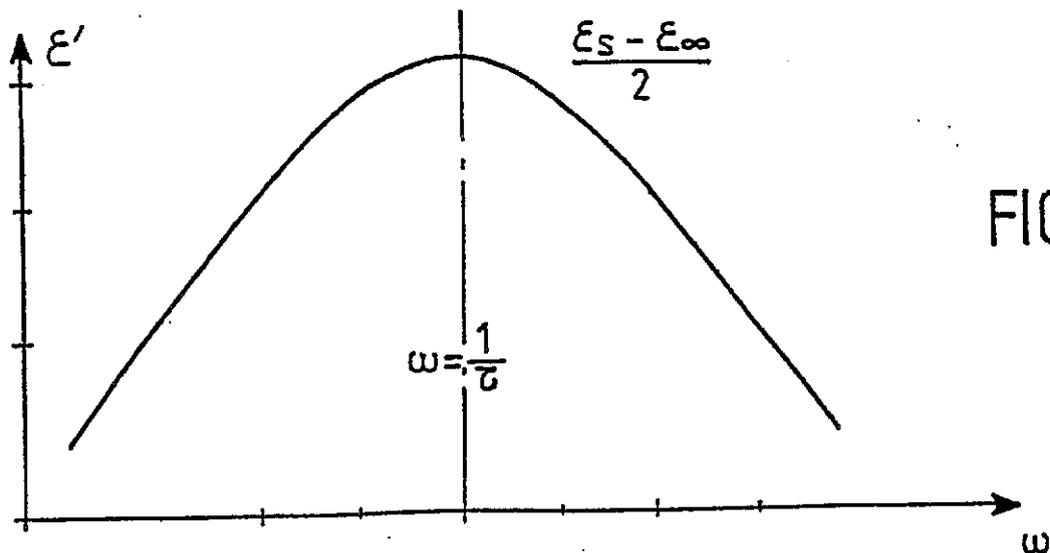


FIG. 3B

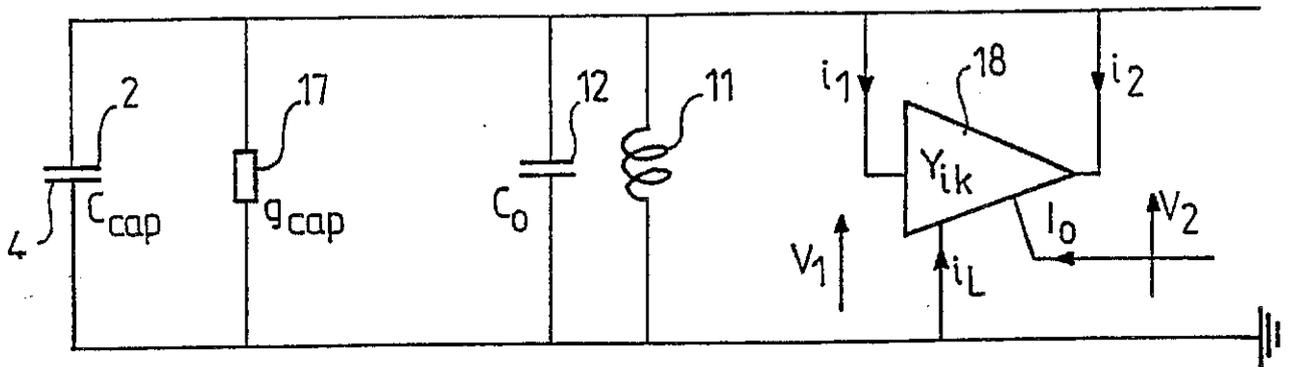


FIG. 4

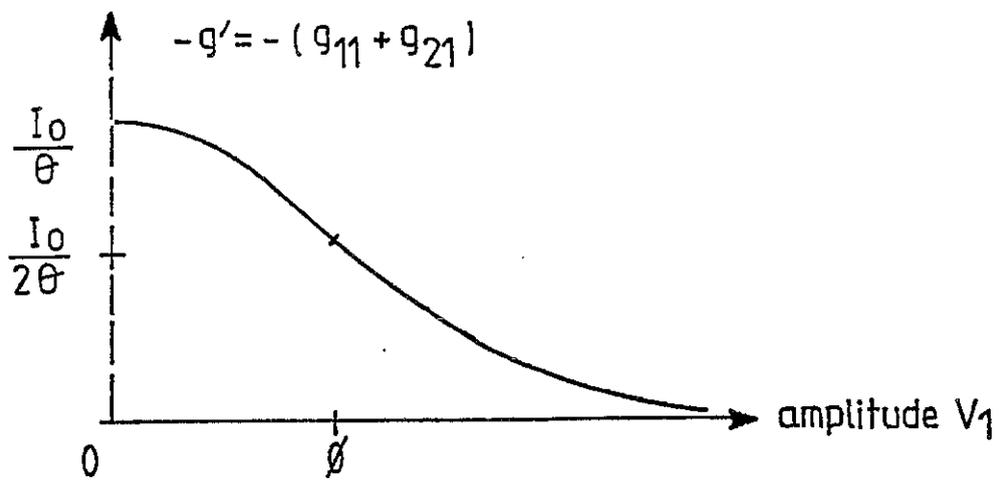


FIG. 5

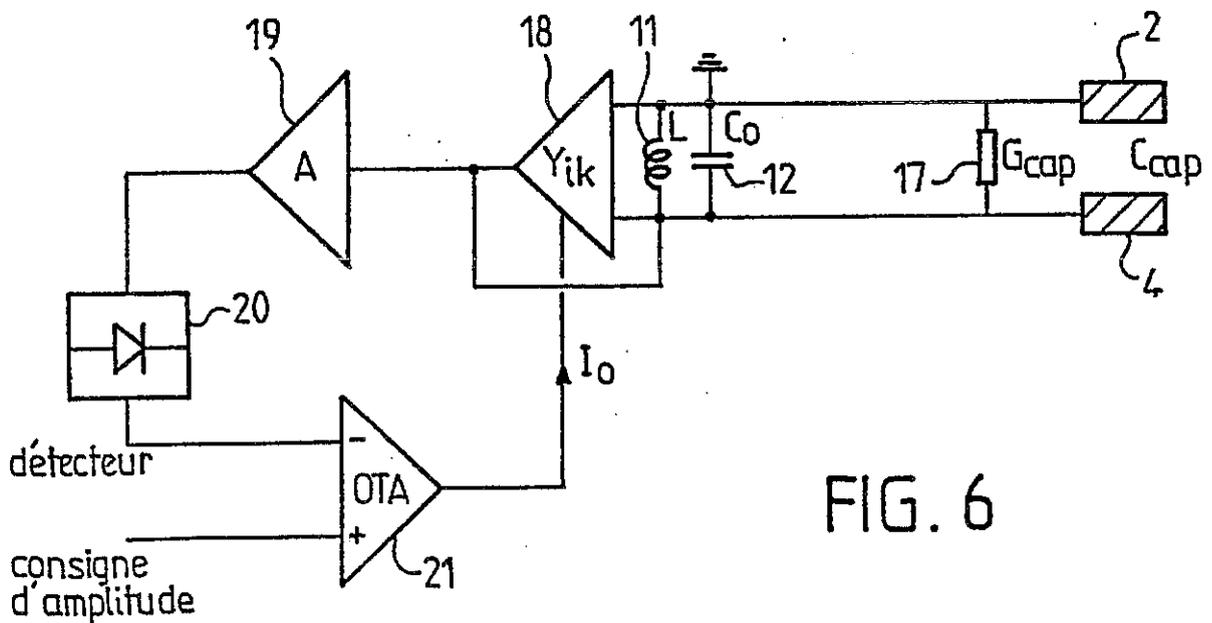


FIG. 6

4/9

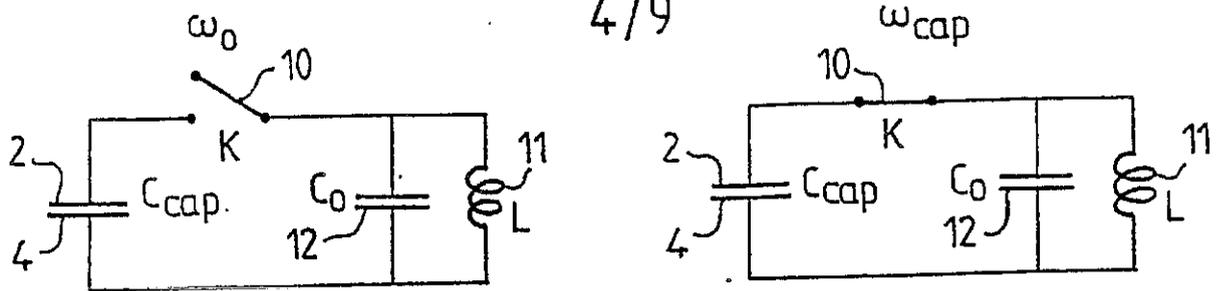


FIG. 7

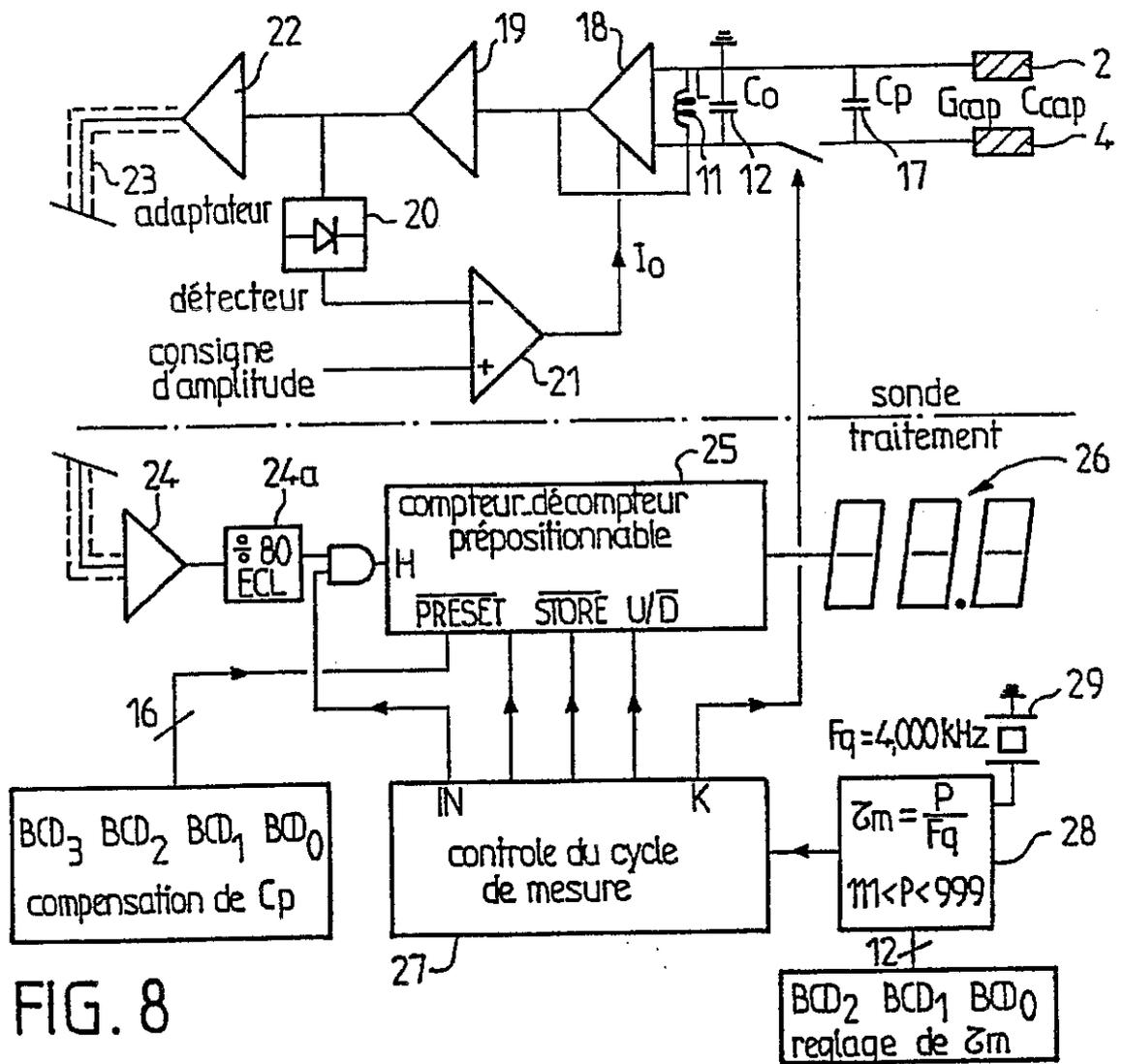
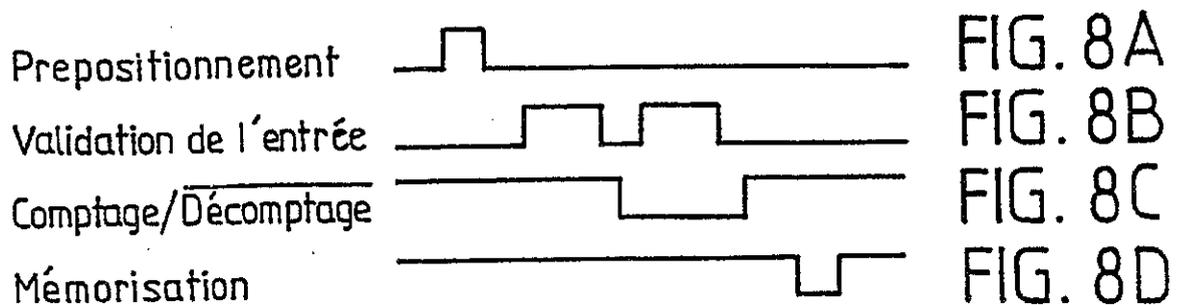


FIG. 8



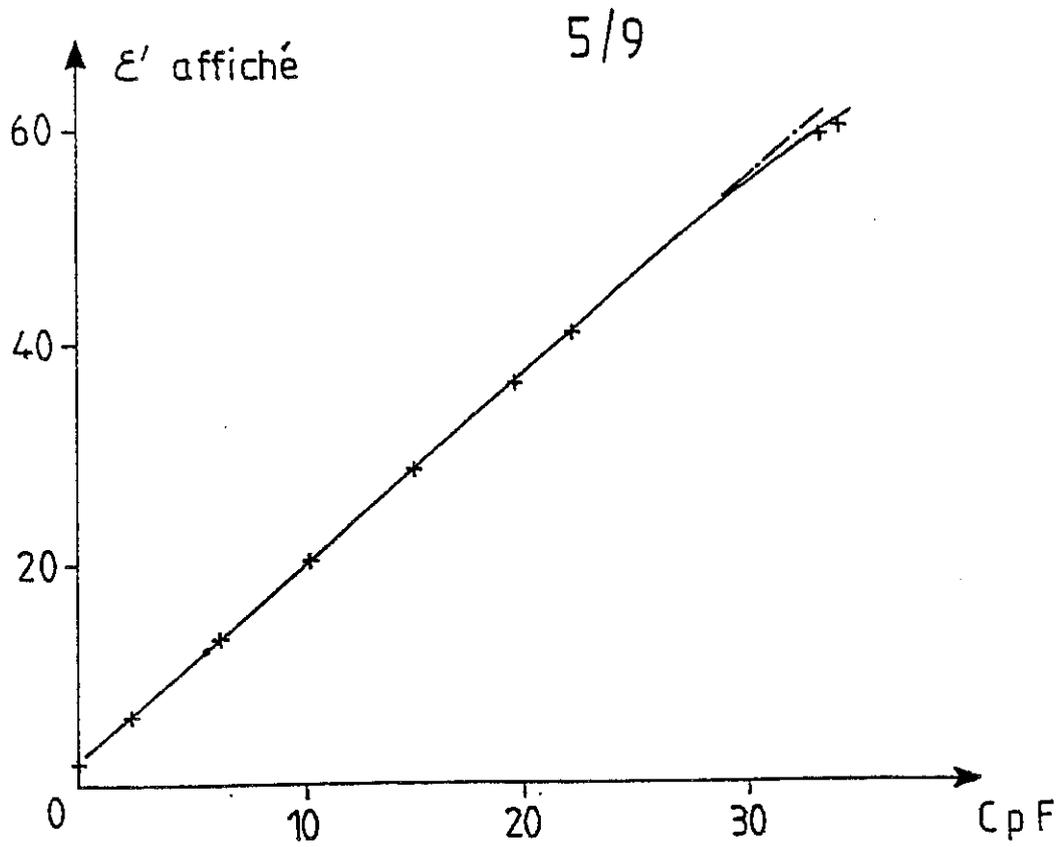


FIG. 8 E

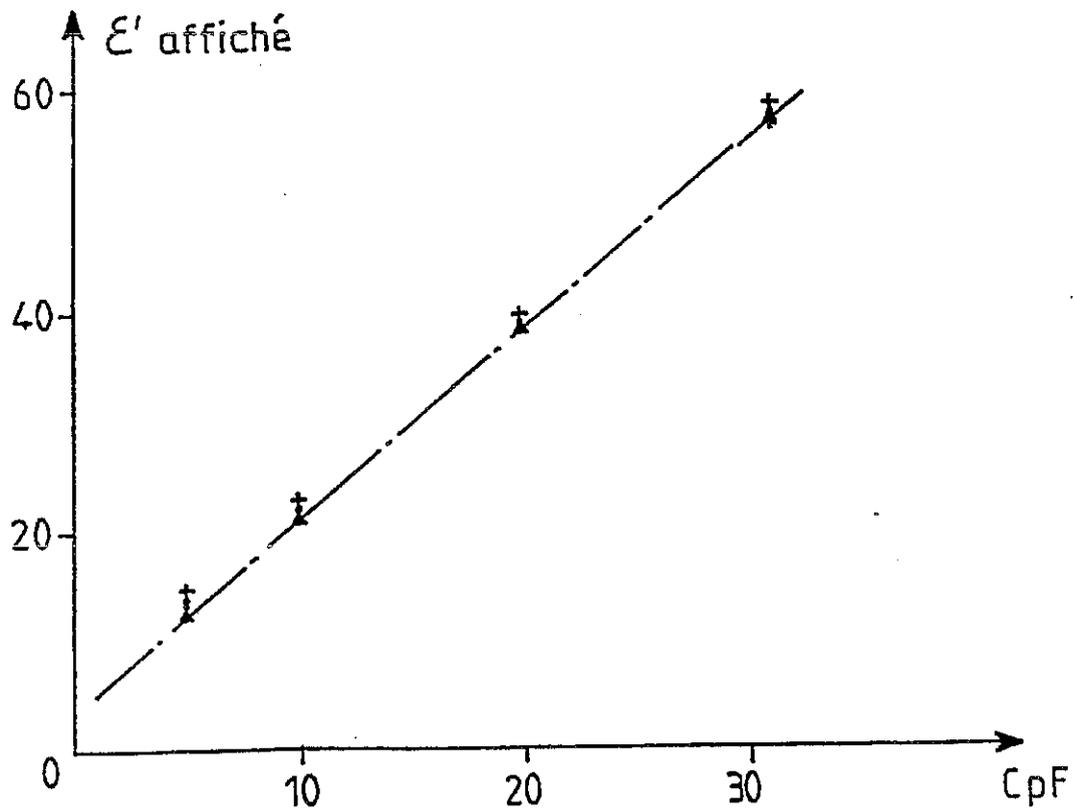


FIG. 8 F

6/9

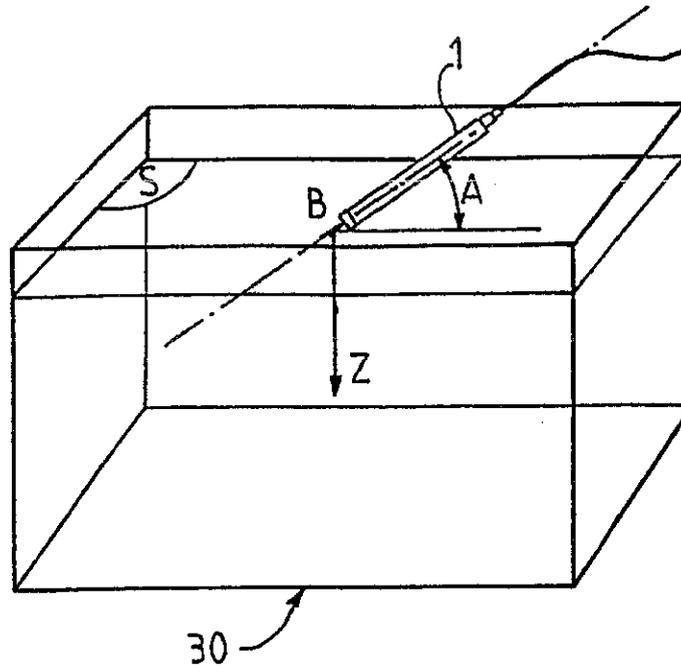


FIG. 9

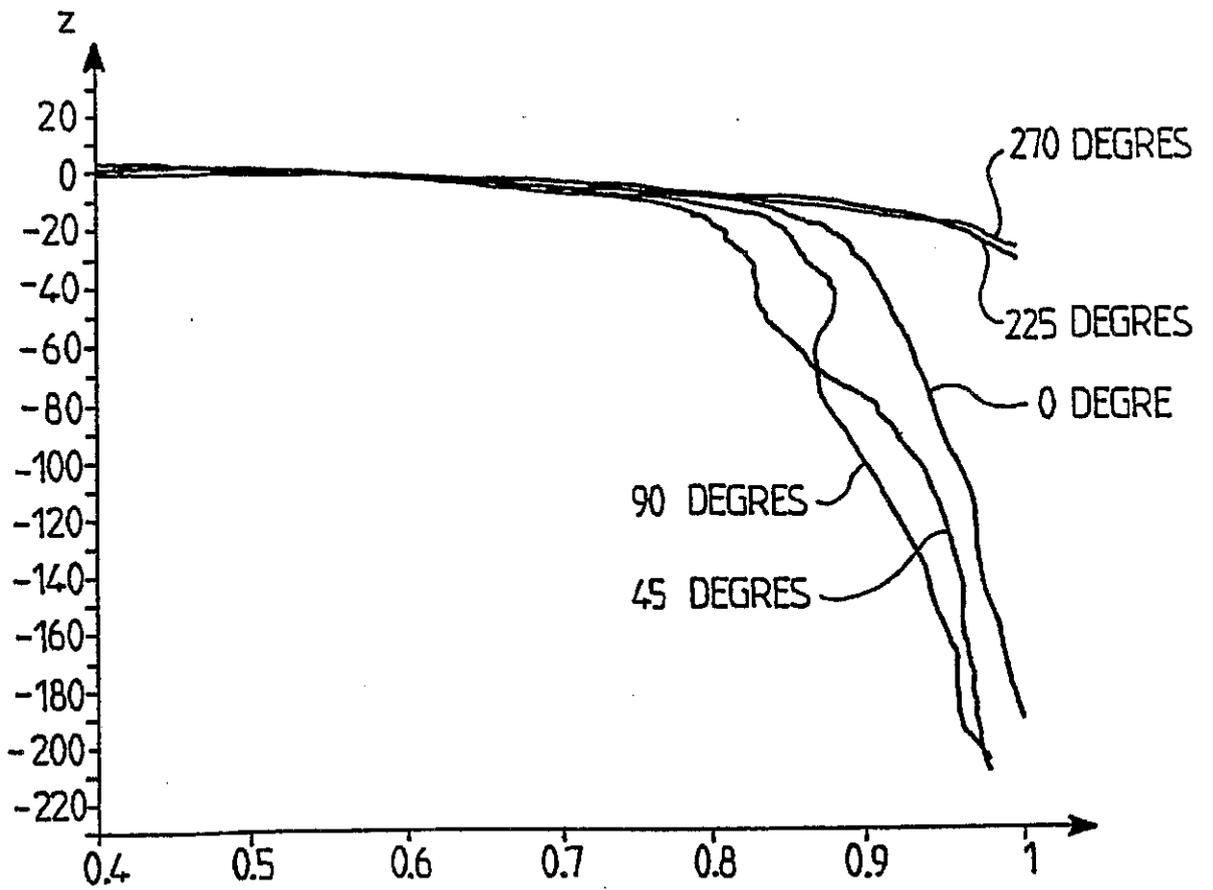


FIG. 10

7/9

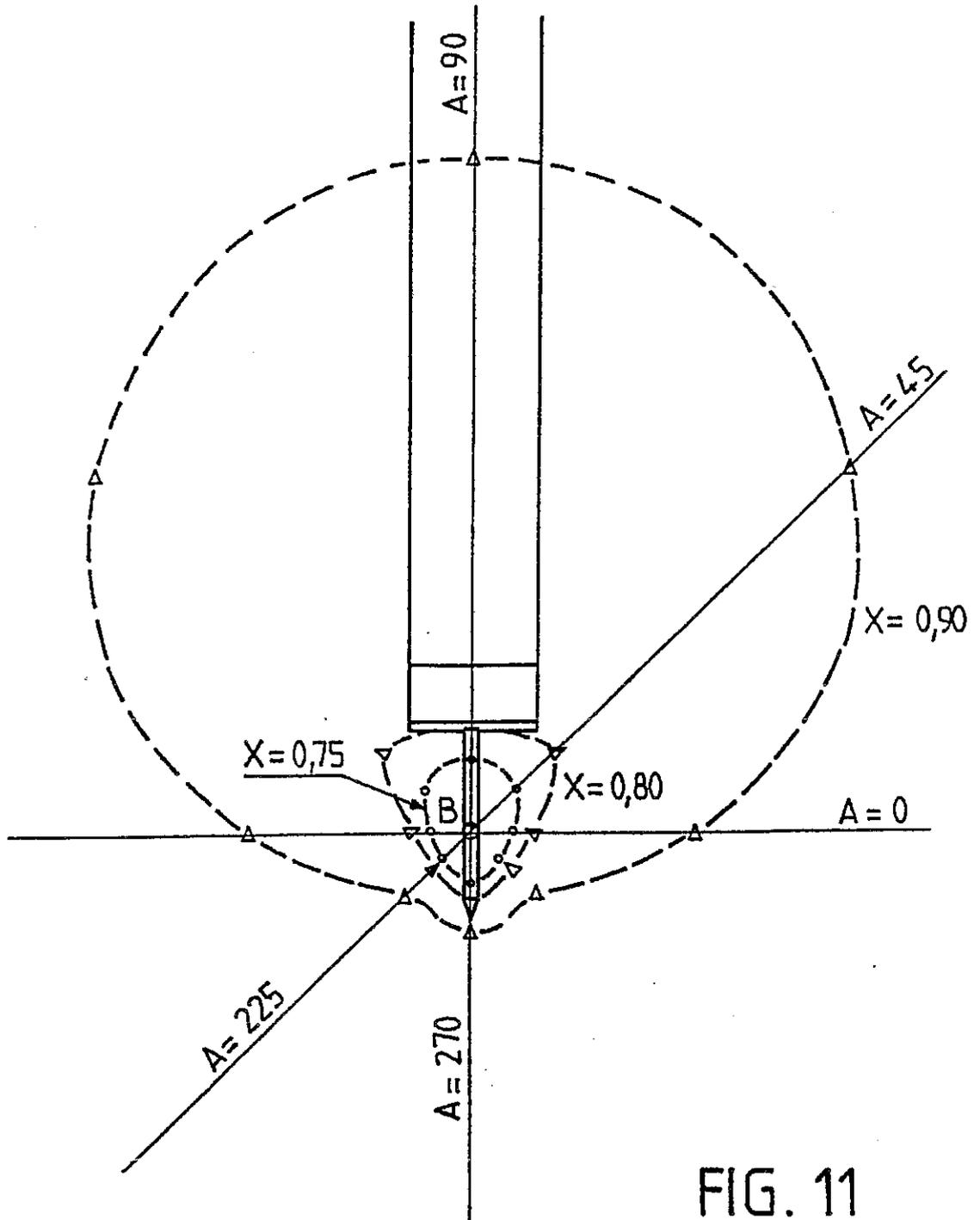


FIG. 11

9/9

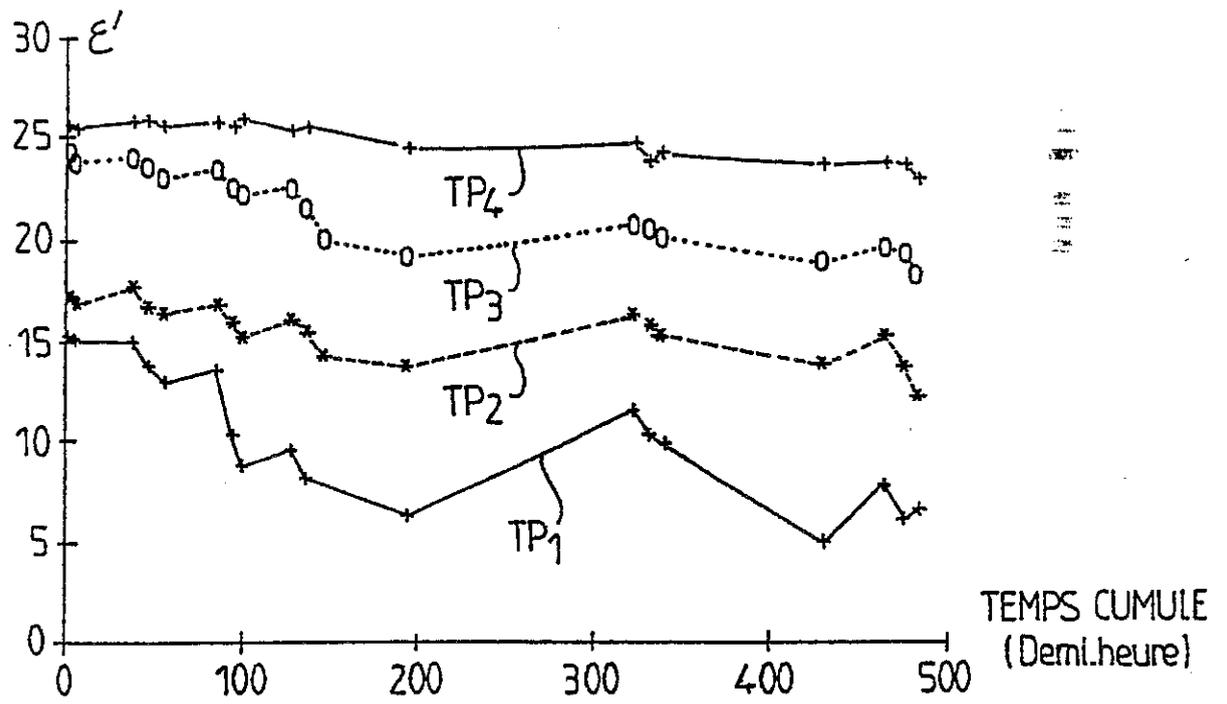


FIG. 14

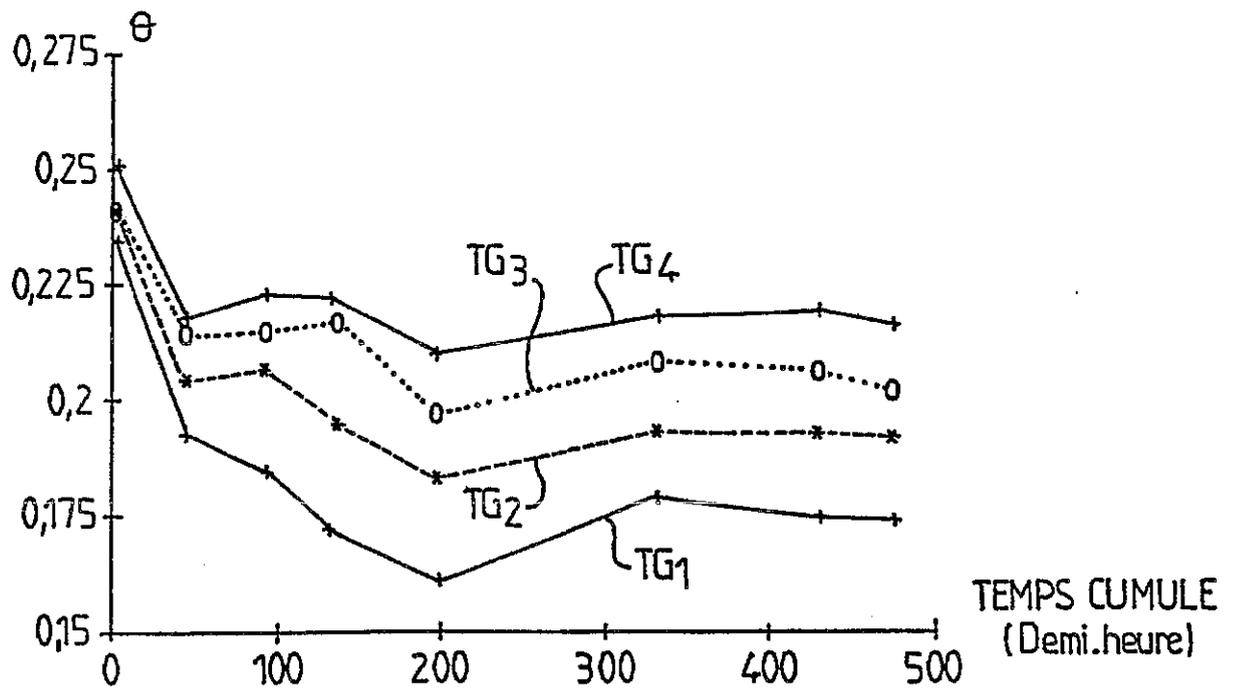


FIG. 15

8/9

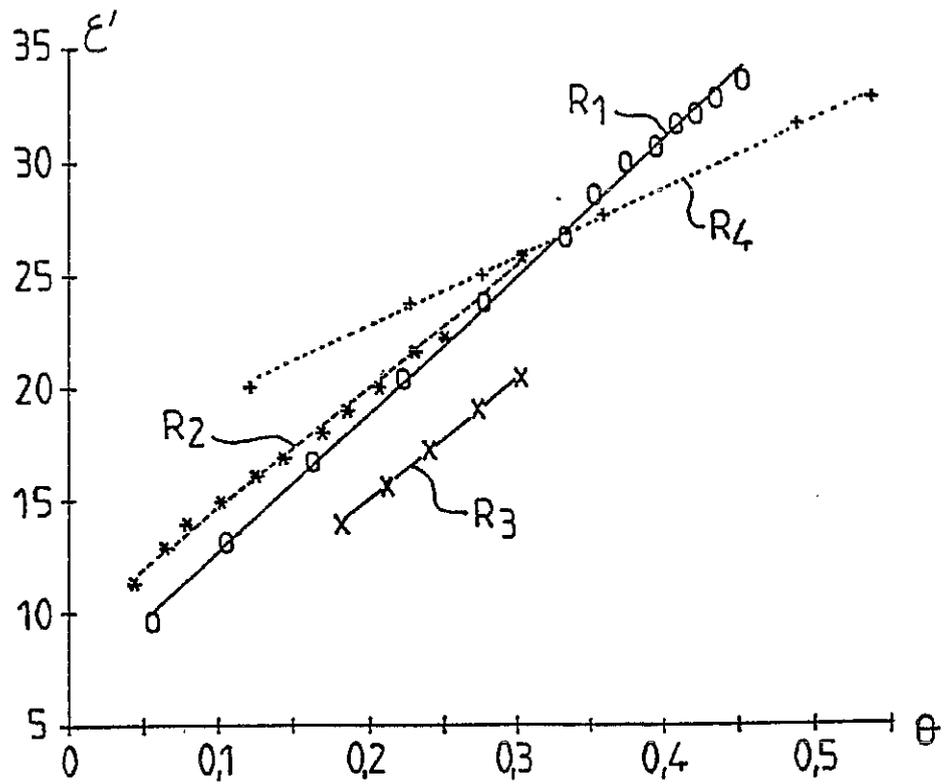


FIG. 12

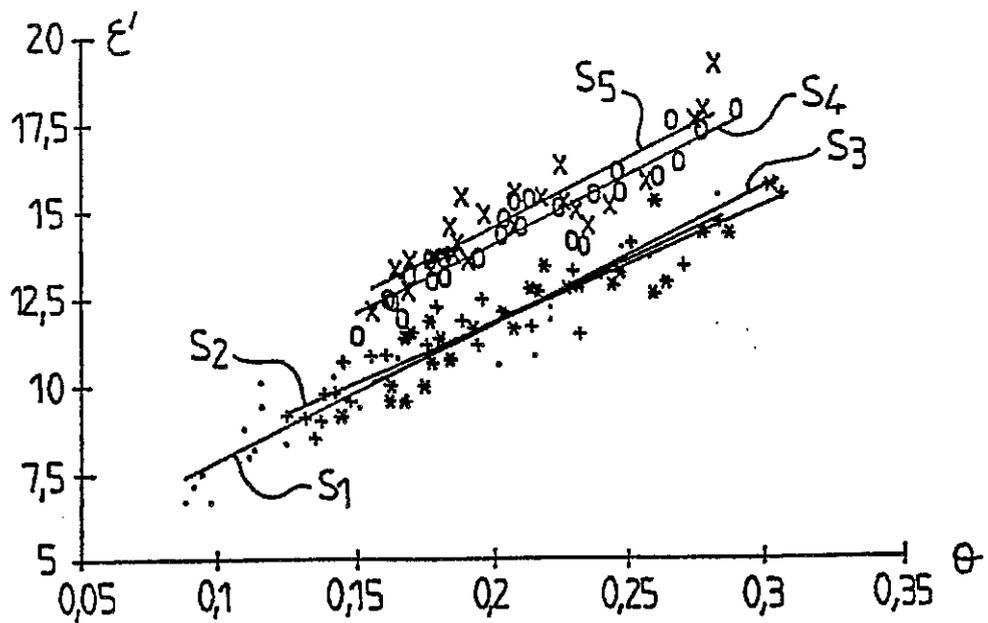


FIG. 13

AVIS DOCUMENTAIRE

(art. 19 de la loi n°68-1 modifiée du 2 janvier 1968 ; art. 40 à 53 du décret n°79-822 du 19 septembre 1979)

N°

Etabli par :

l'Institut national de la propriété industrielle

OBJET DE L'AVIS DOCUMENTAIRE

■ Conférant à son titulaire le droit exclusif d'exploiter l'invention, le brevet constitue pour les tiers, une importante exception à la liberté d'entreprendre.

C'est la raison pour laquelle la loi prévoit qu'un brevet n'est valable que si, entre autres conditions, l'invention :

- est "nouvelle", c'est-à-dire n'a pas été rendue publique en quelque lieu que ce soit, avant sa date de dépôt,
- implique une "activité inventive", c'est-à-dire dépasse le cadre de ce qui aurait été évident pour un homme du métier.

■ L'Institut n'est pas habilité, sauf absence manifeste de nouveauté, à refuser un brevet pour une invention ne répondant pas aux conditions ci-dessus.

C'est aux tribunaux qu'il appartient d'en prononcer la nullité à la demande de toute personne intéressée, par exemple à l'occasion d'une action en contrefaçon.

L'Institut est toutefois chargé d'annexer à chaque brevet un "AVIS DOCUMENTAIRE" destiné à éclairer le public et les tribunaux sur les antériorités susceptibles de s'opposer à la validité du brevet.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT AVIS

■ Il a été établi sur la base des "revendications" dont la fonction est de définir les points sur lesquels l'inventeur estime avoir fait œuvre inventive et entend en conséquence être protégé.

■ Il a été établi à l'issue d'une procédure contradictoire (1) au cours de laquelle :

- le résultat d'une recherche d'antériorités effectuée parmi les brevets et autres publications a été notifié au demandeur et rendu public.
- les tiers ont présenté des observations visant à compléter le résultat de la recherche
- le demandeur a modifié les revendications pour tenir compte du résultat de cette recherche
- le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.
- le demandeur a présenté des observations pour justifier sa position.

EXAMEN DES ANTERIORITES

- Cet examen n'a pas été nécessaire, car aucun brevet ou autre publication n'a été relevé en cours de procédure.
- Les brevets et autres publications (1), ci-après, cités en cours de procédure, n'ont pas été examinés car pour être efficace, cet examen suppose au préalable une vérification des priorités (2) :
- Les brevets et autres publications (1) ci-après, cités en cours de procédure, n'ont pas été retenus comme antériorités :

AT-B- 350 815 - FR-A-1 578 589 - CH-A- 651 931

CONCLUSION : EN L'ETAT, AUCUNE ANTERIORITE N'A ETE RETENUE

(1) - Les pièces du dossier, ainsi que les brevets et autres publications cités, peuvent être consultés à l'INPI ou délivrés en copie.

(2) - Tout renseignement peut être obtenu de l'INPI : demander l'aide-mémoire "Intercalaires et interférences".