

19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

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

2 862 698

21) N° d'enregistrement national : 04 10859

51) Int Cl⁷ : E 21 B 47/12

12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22) Date de dépôt : 14.10.04.

30) Priorité : 15.10.03 US 60511467; 09.09.04 US 10711309.

43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 27.05.05 Bulletin 05/21.

56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Ce dernier n'a pas été établi à la date de publication de la demande.*

60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71) Demandeur(s) : SERVICES PETROLIERS SCHLUMBERGER Société anonyme — FR.

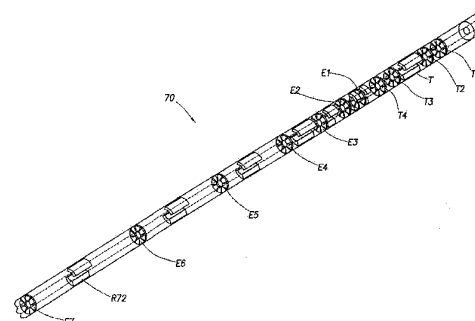
72) Inventeur(s) : MINERBO GERALD, DAVYDYCHEVA SOFIA, WANG HANMING et HOMAN DEAN.

73) Titulaire(s) :

74) Mandataire(s) : BREVALEX.

54) MESURES D'INDUCTION AVEC EFFETS DE TROU DE SONDE REDUITS.

57) Un outil à induction (70) comprend un mandrin conducteur; au moins un dispositif comprenant un émetteur (T), une bobine de compensation, et un récepteur (R72) disposé dans un corps d'outil isolant entourant le mandrin conducteur; et une électrode disposée sur le corps d'outil isolant à un emplacement choisi entre la bobine de compensation et le récepteur (R72), dans lequel l'emplacement choisi est espacé de l'émetteur (T) d'une distance correspondant approximativement à la moyenne harmonique de la distance entre l'émetteur (T) et la bobine de compensation et de la distance entre l'émetteur (T) et le récepteur (R72), et dans lequel l'électrode comprend un contact formant un chemin conducteur jusqu'au mandrin conducteur. Des électrodes supplémentaires (T1, T4) peuvent être disposées au-dessus et en dessous de chaque bobine d'émetteur et de récepteur pour réduire la sensibilité à l'excentricité de l'outil dans le trou de sonde.



FR 2 862 698 - A1



MESURES D'INDUCTION AVEC EFFETS DE TROU DE SONDE
RÉDUITS

Arrière-plan de l'invention

Domaine de l'invention

La présente invention concerne d'une manière générale des techniques pour la diagrapie de la résistivité de formations en utilisant des outils à induction. Plus particulièrement, l'invention concerne
5 des outils à induction et des procédés pour réduire des effets de trou de sonde dans les mesures de résistivité.

Art d'arrière plan

Des outils à induction électromagnétiques (EM)
10 sont utilisés dans l'industrie du pétrole et du gaz pour déterminer la résistivité de formations terrestres entourant un trou de sonde. Les outils à induction fonctionnent en utilisant une bobine émettrice (émetteur) pour générer un champ magnétique alternatif
15 dans les formations terrestres. Ce champ magnétique alternatif induit des courants de Foucault dans les formations. Une ou plusieurs bobines réceptrices (récepteurs), disposées à une distance de l'émetteur, sont utilisées pour détecter le courant circulant dans
20 la formation terrestre. Les amplitudes des signaux reçus sont approximativement proportionnelles à la conductivité de la formation. Par conséquent, les conductivités de formations peuvent être calculées à partir des signaux reçus.

25 Les outils à induction EM à câble et LWD (Logging While Drilling, diagrapie en cours de forage) sont mis

en œuvre avec des bobines (antennes) qui peuvent fonctionner comme sources et/ou comme détecteurs. Sur les outils à induction EM à câble, les antennes sont typiquement enfermées dans un logement (ou corps
5 d'outil) construit en matériau plastique dur (isolant), par exemple, un matériau en fibres de verre stratifié imprégné de résine époxy. Sur les outils à induction EM LWD, les antennes sont généralement montées sur des supports métalliques (colliers) pour résister aux
10 environnements rudes rencontrés pendant le forage.

A la fois sur les outils à induction à câble et LWD, les antennes sont typiquement espacées l'une de l'autre le long de l'axe de l'outil. Ces antennes sont généralement des bobines du type solénoïde qui
15 comprennent une ou plusieurs spires de fil conducteur isolé enroulées autour d'un support. Les brevets U.S. numéros 4 873 488 et 5 235 285 (tous deux cédés au présent demandeur), par exemple, décrivent des instruments équipés d'antennes disposées le long d'un
20 support métallique central (un mandrin conducteur).

Une bobine (ou antenne) transportant un courant peut être représentée comme un moment magnétique proportionnel au courant et à la superficie. La direction et l'amplitude du moment magnétique peuvent
25 être représentées par un vecteur perpendiculaire au plan de la bobine. Dans les instruments de diagrapie à induction et propagation classiques, les antennes émettrice et réceptrice sont montées avec leurs moments magnétiques alignés sur l'axe longitudinal des
30 instruments. Autrement dit, ces instruments ont des dipôles magnétiques longitudinaux (LMD). Quand un outil

LMD est placé dans un trou de sonde et alimenté en énergie pour transmettre de l'énergie EM, les courants de Foucault induits circulent en boucles autour de l'antenne dans le trou de sonde et dans la formation
5 environnante. Ces courants de Foucault circulent dans des plans qui sont perpendiculaires à l'axe de l'outil (donc, l'axe du trou de sonde). Par conséquent, aucun courant de Foucault ne circule vers le haut ou vers le bas du trou de sonde quand l'outil est centré dans le
10 trou de sonde.

Une technique émergente dans le domaine de la diaggraphie des puits par induction EM est l'utilisation d'instruments incorporant des antennes ayant des antennes inclinées ou transversales, c'est-à-dire que
15 les dipôles magnétiques des antennes sont inclinés ou perpendiculaires à l'axe de l'outil. Autrement dit, ces instruments ont des dipôles magnétiques transversaux ou inclinés (TMD). Ces instruments TMD peuvent induire des courants de Foucault qui circulent vers le haut et vers
20 le bas du trou de sonde et, ainsi, fournissent des mesures qui sont sensibles aux plans inclinés, aux fractures des formations, ou à l'anisotropie des formations. Les outils à induction modernes comprennent typiquement des dispositifs à trois axes, dans lesquels
25 l'émetteur et les récepteurs peuvent chacun comprendre trois bobines disposées dans des orientations différentes (typiquement dans des directions orthogonales). Deux des bobines dans un émetteur ou récepteur à trois axes peuvent être des antennes TMD.
30 Les instruments de diaggraphie équipés de TMD sont décrits, par exemple, dans les brevets U.S. Numéros

4 319 191, 5 508 616, 5 757 191, 5 781 436, 6 044 325
et 6 147 496.

Tandis que les outils TDM (comprenant des outils à
trois axes) sont capables de fournir des informations
5 supplémentaires sur la résistivité de la formation, ces
outils sont plus fortement affectés par le trou de
sonde, particulièrement dans des situations à fort
contraste, c'est-à-dire, quand la boue dans le trou de
sonde est plus conductrice que la formation. Quand un
10 outil TDM est alimenté en énergie au centre d'un trou
de sonde (désigné par 20 sur la figure 1a), il peut
induire des courants de Foucault circulant vers le haut
et vers le bas du trou de sonde. Cependant, en raison
de la symétrie, les courants vers le haut et vers le
15 bas s'annulent et il n'y a aucun courant résultant
circulant vers le haut ou vers le bas dans le trou de
sonde. Quand un outil TDM est excentré, la symétrie
peut disparaître. Si l'outil TDM est excentré dans une
direction parallèle à la direction du dipôle magnétique
20 de son antenne (désignée par 22 sur la figure 1a), la
symétrie par rapport à l'antenne est maintenue et il
n'y a toujours aucun courant résultant circulant le
long de l'axe du trou de sonde, quand l'antenne est
alimenté en énergie. Cependant, si un outil TMD est
25 excentré dans une direction perpendiculaire à la
direction du dipôle magnétique de son antenne
(représentée comme 21 sur la figure 1a), la symétrie
n'existe plus et il y aura des courants résultants
circulant vers le haut ou vers le bas du trou de sonde,
30 quand l'antenne est alimenté en énergie. Dans des
situations à fort contraste (c'est-à-dire, boue

conductrice et formation résistive), les courants de trou de sonde peuvent circuler sur une longue distance le long du trou de sonde. Le flux de courant dans la formation sera également asymétrique dans ce cas. Ces courants asymétriques induisent des signaux indésirables dans les récepteurs TMD qui peuvent être de nombreuses fois plus grands que les signaux attendus de la formation.

Le brevet U.S. N° 5 041 975 (cédé au présent demandeur) décrit une technique pour traiter des données provenant de mesures de fond du trou pour corriger les effets de trou de sonde. Le brevet U.S. N° 5 058 077 décrit une technique pour traiter des données provenant de détecteur de fond du trou pour compenser l'effet de rotation excentrique sur le détecteur pendant le forage. Le brevet U.S. N° 6 541 979 (cédé au présent demandeur) décrit des techniques pour réduire l'effet d'excentricité de trou de sonde, en utilisant des corrections mathématiques pour les effets de courants de trou de sonde.

Le brevet U.S. N° 6 573 722 (cédé au présent demandeur) décrit des procédés pour réduire l'effet d'excentricité d'outil dans le trou de sonde en réduisant au minimum les courants de trou de sonde passant devant les antennes TMD. Dans un mode de réalisation, une électrode placée en dessous de l'antenne TMD est câblée à une autre électrode placée au-dessus de l'antenne TMD pour fournir un chemin conducteur derrière l'antenne TMD. Ce chemin conducteur supplémentaire réduit la quantité de courants de trou

de sonde passant devant l'antenne TMD, et réduit ainsi au minimum les effets indésirables. Dans un autre mode de réalisation, un outil est décrit qui génère un courant localisé dans le trou de sonde (entre les deux
5 électrodes placées de chaque côté d'une antenne TMD) qui contrecarre ou annule les courants de trou de sonde indésirables. D'autres exemples de procédés et d'appareil pour réduire les effets de courant de trou de sonde comprennent les brevets U.S. N° 6 573 722 B2,
10 6 624 634 B2, 6 693 430 B2, 6 680 613 B2, 6 710 601 B2, tous ceux-ci étant délivrés au nom de Rosthal et al. et cédés au demandeur de la présente demande, et les Demandes de brevet U.S. publiées Numéros de série 2003/0146753 A1 et 2003/0155924 A1, les deux étant au
15 nom de Rosthal et al. et cédées au demandeur de la présente demande.

Tandis que ces procédés d'art antérieur sont efficaces dans la réduction des effets de trou de sonde sur les outils à induction, il reste un besoin pour
20 d'autres améliorations dans la conception d'outils à induction qui soient moins affectés par l'excentricité des outils dans le trou de sonde. Des études expérimentales ont montré que la stratégie d'annulation du flux de courant vers le haut et vers le bas du trou de sonde n'a pas donné de performance satisfaisante. De
25 grandes électrodes peuvent produire un signal d'erreur dépendant de la température, il est donc préférable d'utiliser de petites électrodes.

30 Résumé de l'invention

Un aspect de l'invention concerne des outils à induction. Un outil à induction conformément à un mode de réalisation de l'invention comprend un mandrin conducteur ; au moins un dispositif comprenant un émetteur, une bobine de compensation, et un récepteur disposé dans un corps d'outil isolant entourant le mandrin conducteur ; et une électrode disposée dans le corps d'outil isolant à un emplacement choisi entre la bobine de compensation et le récepteur, dans lequel l'emplacement choisi est espacé de l'émetteur d'une distance correspondant approximativement à une moyenne harmonique d'une distance entre l'émetteur et la bobine de compensation et d'une distance entre l'émetteur et le récepteur, et dans lequel l'électrode comprend un contact la reliant au mandrin conducteur.

Un autre aspect de l'invention concerne des procédés pour concevoir des outils à induction. Un procédé conformément à un mode de réalisation de l'invention comprend la disposition d'au moins un dispositif comprenant un émetteur, une bobine de compensation, et un récepteur sur un corps d'outil isolant entourant un mandrin conducteur de l'outil à induction ; la détermination d'un emplacement de sensibilité nulle, où l'emplacement de sensibilité nulle est placé à une moyenne harmonique d'une distance entre l'émetteur et la bobine de compensation et d'une distance entre l'émetteur et le récepteur ; et la disposition d'une petite électrode sur le corps d'outil isolant proche de l'emplacement de sensibilité nulle, dans lequel un chemin conducteur est formé entre l'électrode et le mandrin conducteur.

D'autres aspects et avantages de l'invention seront apparents à partir de la description suivante et des revendications annexées.

5 Brève description des dessins

Les figures 1a et 1b, respectivement, illustrent l'excentricité de l'outil d'un dispositif transversal et la distribution du courant asymétrique qui cause les effets de trou de sonde indésirables.

10 La figure 2 représente un schéma d'un dispositif à trois axes.

La figure 3 montre les effets de l'excentricité sur divers dispositifs transversaux XX sur un outil à induction à corps isolant.

15 La figure 4 montre les effets de l'excentricité sur divers dispositifs transversaux XX sur un outil à induction à corps conducteur.

La figure 5 représente un outil à induction conformément à un mode de réalisation de l'invention.

20 La figure 6 montre les résultats des simulations d'outils comme indiqué sur la figure 5 ayant différents nombres d'électrodes disposées sur le corps d'outil.

La figure 7 montre un outil à induction ayant de petites électrodes conformément à un mode de
25 réalisation de l'invention.

La figure 8A montre une vue élargie d'électrodes conformément à un mode de réalisation de l'invention.

La figure 8B montre une vue en coupe d'une électrode à doigts qui peut être utilisée avec un mode
30 de réalisation de l'invention.

Les figures 8C et 8D montrent d'autres modes de réalisation d'une électrode à doigts qui peut être utilisée avec des modes de réalisation de l'invention.

La figure 9 montre des mesures simulées utilisant un outil représenté sur la figure 7 conformément à un mode de réalisation de l'invention.

La figure 10 montre les effets de l'excentricité sur un outil représenté sur la figure 7 en comparaison avec un outil à corps isolant et un outil à corps en métal.

La figure 11 montre la capacité d'un outil représenté sur la figure 7 pour mesurer l'anisotropie de la formation, en comparaison avec un outil à corps isolant et un outil à corps en métal.

La figure 12 montre la capacité d'un outil représenté sur la figure 7 à mesurer l'anisotropie de la formation en présence d'excentricité d'outil, en comparaison avec un outil à corps isolant et un outil à corps en métal.

La figure 13 montre l'effet de couche formant épaulement sur un outil représenté sur la figure 7, en comparaison avec un outil à corps isolant et un outil à corps en métal.

La figure 14 montre les effets d'excentricité et de couche formant épaulement sur un outil comme indiqué sur la figure 7, en comparaison avec un outil à corps isolant et un outil à corps en métal.

La figure 15 montre les résultats de la figure 14 après élimination des effets de couche formant épaulement d'un outil représenté sur la figure 7, en

comparaison avec un outil à corps isolant et un outil à corps en métal.

La figure 16 montre un outil prototype conformément à un mode de réalisation de l'invention.

5 La figure 17 montre des mesures de conductivité triaxiales à 68,58 cm (27") en présence d'excentricité d'outil en utilisant un outil représenté sur la figure 16, en comparaison avec un outil à corps isolant et un outil à corps en métal.

10 La figure 18 montre des mesures de conductivité triaxiales à 99,06 cm (39") en présence d'excentricité d'outil en utilisant un outil représenté sur la figure 16, en comparaison avec un outil à corps isolant et un outil à corps en métal.

15 La figure 19 montre un modèle informatique d'un outil prototype conformément à un autre mode de réalisation de l'invention.

La figure 20 montre des mesures de conductivité triaxiales à 68,58 cm (27") en présence d'excentricité d'outil en utilisant un outil représenté sur la figure 20 19, en comparaison avec un outil à corps isolant et un outil à corps en métal.

La figure 21 montre un modèle informatique d'un outil prototype conformément à un autre mode de 25 réalisation de l'invention.

La figure 22 montre des mesures de conductivité triaxiales à 68,58 cm (27") en présence d'excentricité d'outil en utilisant un outil représenté sur la figure 21, en comparaison avec un outil à corps isolant et un 30 outil à corps en métal.

La figure 23 montre un procédé pour concevoir un outil qui soit moins influencé par l'excentricité de l'outil.

5 Description détaillée

Des modes de réalisation de l'invention concernent des outils de diagraphie à induction qui sont moins affectés par les effets de trou de sonde. Parce que la distinction entre un outil à induction et un outil à propagation n'est pas pertinente pour la présente invention, le terme "outil à induction" est utilisé dans la présente description pour inclure à la fois les outils à propagation et à induction. De même, les effets de trou de sonde et les effets d'excentricité de l'outil (ou effets d'excentricité) sont utilisés de façon interchangeable dans la présente description parce que la distinction entre eux n'est pas pertinente. L'homme du métier apprécierait que la conductivité est l'inverse de la résistivité et, donc, toute référence à la "conductivité" dans la présente description est censée comprendre son inverse, la "résistivité" et vice versa.

Comme noté plus haut, les dispositifs à induction avec moments magnétiques perpendiculaires (c'est-à-dire, transversaux) à l'axe du trou de sonde sont plus sensibles aux effets de trou de sonde. De plus, la sensibilité d'une bobine transversale à l'excentricité est très différente selon que l'excentricité est dans la direction du moment magnétique ou perpendiculaire au moment magnétique. Dans la présente description, un dispositif transversal est utilisé au sens large pour

comprendre n'importe quel dispositif ayant une composante transversale dans son moment magnétique. Par exemple, un dispositif ayant une bobine inclinée (c'est-à-dire, une bobine non parallèle ni
5 perpendiculaire à l'axe de l'outil) aura une composante transversale dans son moment magnétique et, donc, peut être mentionnée comme un dispositif transversal dans la présente description. Notez qu'un dispositif à trois axes comprend deux dispositifs transversaux et, donc,
10 la description suivante concernant un dispositif transversal est aussi applicable aux "composants transversaux" dans un dispositif à trois axes.

La figure 1a montre qu'un outil de diaggraphie peut avoir son antenne à dipôle magnétique transversal ou
15 incliné (TMD) placée au centre (représenté comme 20) du trou de sonde 13 ou excentrée dans une direction parallèle (représentée comme 22) ou une direction perpendiculaire (représentée comme 21). La direction parallèle ou perpendiculaire est par rapport à la
20 direction du dipôle magnétique de l'antenne. L'excentricité parallèle 22 produit des courants de Foucault vers le haut et vers le bas du trou de sonde. Cependant, du fait de la symétrie, aucun courant résultant ne circule vers le haut ou vers le bas du
25 trou de sonde. Ainsi, un outil ayant son antenne TMD excentrée dans la direction parallèle 22 ne produit pas plus d'effets indésirables qu'un outil ayant son antenne TMD parfaitement au centre du trou de sonde 20. En revanche, un outil ayant son antenne TMD excentrée
30 dans la direction perpendiculaire 21 induit des courants de Foucault qui circulent vers le haut et vers

le bas du trou de sonde, mais sans la symétrie pour compenser les courants vers le haut et vers le bas. Il en résulte que l'excentricité perpendiculaire 21 génère des courants de trou de sonde significatifs 23, comme
5 indiqué sur la figure 1b. Le flux de courant dans la formation est aussi asymétrique dans ce cas. La distribution asymétrique de courant produit un signal fort dans un récepteur 24 disposé sur l'instrument 10 à résistivité.

10 L'excentricité perpendiculaire 21 et l'excentricité parallèle 22 représentées sur la figure 1a illustrent les extrêmes des déplacements de l'outil par rapport au centre du trou de sonde 20. Dans un cas typique, l'excentricité se situerait probablement entre
15 ces deux extrêmes, c'est-à-dire, excentricité dans une direction qui est une combinaison à la fois des directions x et y.

Un outil à induction typique, comme l'outil AIT™ de Schlumberger Technology Corp. (Houston, Texas),
20 comprend plusieurs dispositifs à induction comprenant un émetteur commun et plusieurs récepteurs espacés par rapport à l'émetteur. Les outils à induction peuvent aussi comprendre des électrodes en plus des bobines, comme décrit par exemple dans les brevets U.S. numéros
25 6 573 722, 6 680 613 et 6 710 601 délivrés au nom de Rosthal et al. Des exemples de tels outils à induction sont décrits dans le brevet U.S. numéro 4 873 488 délivré au nom de Barber et al., et 5 041 975 délivré au nom de Minerbo et al. Dans un outil à induction
30 typique, chaque récepteur principal dans le dispositif peut être connecté en série avec une bobine de

compensation. La fonction d'une bobine de compensation est d'annuler le couplage direct entre l'émetteur et le récepteur.

Quand la bobine de compensation est optimisée, le récepteur ne devrait produire aucun signal dans un milieu à conductivité zéro (par exemple, l'air) ; cette condition est mentionnée comme équilibre mutuel. L'homme du métier apprécierait que le nombre des spires de la bobine de compensation et l'espacement entre l'émetteur et la bobine de compensation peuvent être correctement choisis pour proposer une annulation optimale de l'accouplement direct entre l'émetteur et le récepteur principal.

En faisant référence à la figure 2, la condition d'équilibre mutuel peut être exprimée approximativement comme

$$M_z^B = -\left(\frac{Z_B}{Z_R}\right)^3 M_z^R \cdot (1)$$

où M_z^B , M_z^R sont les moments magnétiques dans la direction z pour les bobines de compensation et le récepteur principal, respectivement, et Z_B , Z_R , sont les distances (espacements) de l'émetteur pour les bobines de compensation et le récepteur, respectivement. Pour un dispositif à trois axes, la même condition s'applique aux couplages x et y.

Les outils à induction modernes comprennent souvent un ou plusieurs dispositifs à trois axes, dans lesquels l'émetteur, le récepteur principal et la bobine de compensation peuvent comprendre chacun trois

bobines (antennes) dans des orientations différentes (généralement, dans des directions orthogonales). La figure 2 représente un schéma d'un dispositif à trois axes typique, qui comprend un émetteur (T), un récepteur principal (R) et une bobine de compensation (B). Comme représenté, chacun de l'émetteur, du récepteur principal et de la bobine de compensation a trois bobines séparées, qui ont des moments magnétiques dans des directions orthogonales. Les trois moments magnétiques de l'émetteur (T) sont représentés comme M_X^T , M_Y^T , M_Z^T . Les trois moments magnétiques du récepteur principal sont représentés comme M_X^R , M_Y^R , M_Z^R . Les trois moments magnétiques des bobines de compensation sont représentés comme M_X^B , M_Y^B , M_Z^B .

Parce que l'émetteur et le récepteur dans un dispositif à trois axes comprennent chacun trois antennes (voir figure 2), neuf tensions complexes seraient enregistrées en utilisant un dispositif à trois axes, donnant une matrice de conductivités apparentes comme suit :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{XX} & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{YX} & \sigma_{YY} & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_{ZZ} \end{bmatrix}.$$

Parce que ces neuf couplages sont obtenus avec des antennes dans des directions différentes, ils seront affectés par l'excentricité de l'outil ou les effets de trou de sonde à des degrés différents. La figure 3 illustre des mesures de tension simulées pour divers

couplages de dispositifs à trois axes dans un outil à corps isolant (non représenté). Les espacements entre les bobines de l'émetteur et du récepteur principal sont 68,58 cm, 99,06 cm, 137,16 cm et 182,88 cm (27, 39, 5 54 et 72 pouces). La fréquence d'exploitation est 26,8 kHz pour tous les calculs et toutes des mesures dans la présente description.

Sur la figure 3, les signaux R calculés de couplages XX provenant de divers dispositifs sont 10 tracés par rapport au déplacement de l'outil (excentricité) le long de l'axe y dans le trou de sonde. Le trou de sonde a un diamètre de 21,59 cm (8,5 pouces) et est rempli de boue ayant une conductivité de 5000 mS/m. Il est évident de la figure 3 que les 15 erreurs dans les signaux XX sont grandes, en comparaison avec la conductivité de la formation, 50 mS/m. Dans une boue conductrice, pour un déplacement (excentricité) le long de l'axe y, les erreurs dans les couplages XX sont beaucoup plus grandes que les erreurs 20 dans les couplages YY. Voir les brevets U.S. numéro 6 573 722 délivré au nom de Rosthal et al. et 6 556 015 délivré au nom de Omeragic et al.

Les effets de trou de sonde comme vus sur la figure 3 peuvent être réduits au minimum si un corps 25 d'outil conducteur (par exemple, corps en métal) est utilisé. La figure 4 montre l'effet d'excentricité d'un outil à corps en métal (non représenté) dans un trou de sonde conducteur. Les signaux R des couplages XX pour les quatre espacements émetteur - récepteur sont tracés 30 par rapport au déplacement d'outil (excentricité) le long de la direction y dans le trou de sonde. Pour les

espacements plus longs 99,06 cm (39"), 137,16 cm (54")
et 182,88 cm (72"), les couplages XX sont pratiquement
indépendants de l'excentricité d'outil. Cependant, le
dispositif à espacement plus court 27XX est encore
5 significativement affecté par l'excentricité de l'outil.

Tandis qu'un corps en métal peut fournir une
réduction efficace des effets de trou de sonde, le
corps en métal provoque des erreurs liées à la
température dans les mesures. Une alternative à la
10 conception d'outil à corps en métal est décrite dans la
Demande de brevet en cours N° de série 10/604 622
déposée le 5 août 2003 par Barer et al. et le brevet
N° 6 667 620 délivré le 23 décembre 2003 au nom de
Homan et al. Les outils à induction décrits dans ces
15 demandes de brevet ont des boîtiers (corps d'outil)
isolants pour les bobines de récepteur. Le corps
isolant comprend des électrodes conductrices
(électrodes en anneau ou électrodes à doigts) disposées
entre les bobines de l'émetteur et du récepteur ; les
20 électrodes conductrices sont électriquement mises à la
masse sur le mandrin métallique du support central. Ces
électrodes empêchent le flux asymétrique de courant
dans le trou de sonde, réduisant les contributions
d'erreur de l'excentricité des outils aux couplages XX
25 et YY. Avec ces conceptions, l'effet d'excentricité est
sensiblement réduit en comparaison avec l'outil à corps
isolant. Cependant, ces conceptions donnent une
annulation insuffisante des effets d'excentricité dans
les trous de sonde plus grands. De plus, ce type
30 d'électrode complique la réponse de mesures sur

espacement court même quand on centralise l'outil dans le trou de sonde.

Des modes de réalisation de l'invention améliorent la conception d'un outil à induction en utilisant un certain nombre d'électrodes disposées entre l'émetteur et les récepteurs. Pour comprendre la contribution d'une pluralité d'électrodes dans un corps d'outil isolant, un outil hypothétique avec un nombre croissant d'électrodes est modélisé (figure 5).

L'outil à induction représenté sur la figure 5 comprend un mandrin conducteur M, un corps d'outil B et plusieurs dispositifs. Les dispositifs comprennent un émetteur commun T et une série de récepteurs principaux à des espacements de 68,58 cm (27"), 99,06 cm (39") 137,16 cm (54") et 182,88 cm (72"), désignés comme R27, R39, R54 et R72, respectivement. De plus, des bobines de compensation correspondantes, B27, B39, B54 et B72 sont comprises pour réduire les couplages mutuels entre l'émetteur et les récepteurs principaux. Plusieurs électrodes (électrodes 1-6) conçues pour réduire les effets de trou de sonde sont aussi représentées sur l'outil. Les simulations suivantes sont exécutées avec diverses électrodes (électrodes 1 à 6) incluses pour étudier la contribution de ces électrodes à la réduction de l'effet de trou de sonde. Dans le premier calcul, seule l'électrode 1 est présente. Dans le deuxième calcul, seules les électrodes 1 et 2 sont présentes, et ainsi de suite.

La figure 6 montre l'effet de l'excentricité transversale pour quatre espacements de récepteur avec un nombre croissant d'électrodes (les courbes 1-6

correspondent aux nombres d'électrodes dans chaque
panneau). Comme indiqué sur la figure 6, le couplage
27XX doit avoir les trois premières électrodes
(électrodes 1-3 sur la figure 5) pour avoir des mesures
5 stables quelle que soit l'excentricité de l'outil. Le
couplage 39XX doit avoir au moins quatre électrodes
(électrodes 1-4 sur la figure 5) pour avoir des mesures
stables. Le couplage 54XX doit avoir cinq électrodes
(électrodes 1-5 sur la figure 5) pour avoir des mesures
10 stables. Pour le couplage 72XX, toutes les six
électrodes sont nécessaires pour obtenir une bonne
annulation de l'effet d'excentricité. Ces résultats
suggèrent qu'une électrode est nécessaire au-dessus et
en dessous de chaque bobine de récepteur. L'électrode
15 (c'est-à-dire, l'électrode 6) au-delà du dernier
récepteur (R72) est de préférence placée à un
emplacement tel que cette électrode (c'est-à-dire,
l'électrode 6) et celle (l'électrode 5) avant le
dernier récepteur (R72) sont placées symétriquement par
20 rapport au récepteur (R72). Autrement dit, dans des
modes de réalisation préférés, l'électrode 5 et
l'électrode 6 "enjambent" ou "chevauchent"
symétriquement le récepteur R72.

De plus, on a constaté que des électrodes
25 supplémentaires peuvent être comprises au-dessus et en
dessous de l'émetteur T pour améliorer l'annulation
d'effet de trou de sonde. Dans des modes de réalisation
préférés, les électrodes au-dessus et en dessous de
l'émetteur sont placées symétriquement autour de
30 l'émetteur pour fournir une bonne annulation de l'effet
de trou de sonde. Dans certains modes de réalisation

préférés, il y a deux électrodes au-dessus et en dessous de l'émetteur pour améliorer l'annulation de l'effet de trou de sonde (voir par exemple, T1-T4 sur la figure 7). Dans certains modes de réalisation, les électrodes au-dessus et en dessous de l'émetteur ont un intervalle axial (longitudinal) plus long que d'autres électrodes. Dans certains modes de réalisation, les électrodes au-dessus et en dessous de l'émetteur sont placées près de l'émetteur.

10

Conception d'outil à électrodes multiples

La susdite simulation révèle à quel endroit les électrodes devraient être placées, c'est-à-dire, une de chaque au-dessus et en dessous de chaque récepteur. Cependant, de grandes électrodes sur un dispositif à induction peuvent provoquer des erreurs inacceptables sur les tensions mesurées (à la fois sur les composants en phase et de quadrature). Ces erreurs ne peuvent pas être facilement corrigées parce que ces erreurs dépendent de la température, et du mouvement mécanique des électrodes par rapport aux bobines. Par conséquent, une étude a été exécutée pour voir si l'effet de trou de sonde peut être annulé en utilisant de petites électrodes placées stratégiquement sur la sonde à induction.

La sensibilité des mesures en raison d'une petite inhomogénéité près du corps de sonde peut être prévue approximativement par le facteur géométrique de Doll. Voir J.H. Moran et K.S. Kunz, "*Basic Theory of Induction Logging and Application to the Study of Two-Coil Sondes*" , Geophysics, Vol. 6, pp. 829- 58,

30

décembre 1962 ; et H.G. Doll, "Introduction to Induction Logging and Application to Logging of Wells Drilled With Oil Base Mud", J. Petroleum Technology, Vol. 1, N°6, pp. 148-62, juin 1949. Une petite
 5 inhomogénéité à la position verticale z produit un changement de tension (ΔV_{zz}) de la tension V_{zz} du récepteur coaxial proportionnelle à

$$\Delta V_{zz} \propto \frac{M_z^T}{z^3} \left(\frac{M_z^R}{|z - z_R|^3} + \frac{M_z^B}{|z - z_B|^3} \right). \quad (2)$$

10

Tous les termes dans l'Équation (2) ont les significations similaires à ceux décrits plus haut en référence à la figure 2. Cette fonction a un zéro à une position z_o , obtenue en résolvant

15

$$\frac{M_z^R}{|z_o - z_R|^3} = - \frac{M_z^B}{|z_o - z_B|^3}. \quad (3)$$

Du fait de la condition d'équilibre mutuel dans l'équation (1), nous pouvons écrire

20

$$\frac{z_R^3}{|z_o - z_R|^3} = \frac{z_B^3}{|z_o - z_B|^3}, \quad (4)$$

ou, de manière équivalente,

25

$$1 - z_o/z_R = z_o/z_B - 1, \quad (5)$$

ce qui donne

$$z_o = \frac{2}{\frac{1}{z_B} + \frac{1}{z_R}} \quad (6)$$

L'équation (6) montre que la position de
5 sensibilité nulle z_o , est à la moyenne harmonique z_B et
 z_R . Autrement dit, la distance de l'emplacement de
sensibilité nulle à partir de l'émetteur est une
moyenne harmonique des distances de l'émetteur à la
bobine de compensation et au récepteur principal. Les
10 couplages XX et YY ont aussi une sensibilité nulle près
de cette position. Notez que l'équation (6) donne un
emplacement de sensibilité nulle exact pour des
antennes dipôles à pointe dans l'air. Cependant, elle
ne donnera qu'un emplacement approximatif pour un outil
15 réel.

La figure 7 montre un outil à induction
conformément à un mode de réalisation de l'invention.
L'outil à induction 70 comprend une petite électrode
près de la position de sensibilité nulle pour chaque
20 récepteur. Le terme "petite électrode" signifie que
l'électrode a un petit (par exemple, 1" soit 2,54 cm)
intervalle axial (longitudinal) (cf. figure 5 et figure
7). Ces petites électrodes constituent une partie plus
petite du corps d'outil (dans le sens de la longueur)
25 et, donc, introduiront moins d'erreurs liées à la
température dans les mesures d'induction. Dans la
présente description, un outil à induction ayant une
pluralité de petites électrodes comprenant des
électrodes disposées aux emplacements de sensibilité

nulle est mentionné comme un outil à induction "à électrodes multiples". Ce terme est utilisé pour le différencier d'un outil à induction d'art antérieur à corps en métal ou d'un outil à induction à corps
5 isolant.

Comme représenté sur la figure 7, une petite électrode E7 est aussi placée en dessous du récepteur le plus éloigné R72, et quatre petites électrodes T1-T4 sont placées autour de l'émetteur T. Dans des modes de
10 réalisation préférés, les électrodes au-dessus d'E6 et en dessous d'E7 du récepteur R72 le plus éloigné sont espacées de manière sensiblement égale du récepteur R72. De même, les électrodes au-dessus (T1, T2) et en dessous (T3, T4) de l'émetteur T sont espacées de
15 manière sensiblement égale de l'émetteur. Notez qu'alors que quatre électrodes (T1-T4) sont représentées, d'autres nombres d'électrodes peuvent aussi être compris autour de l'émetteur. En outre, chacune des électrodes peut être une électrode
20 annulaire continue, une électrode annulaire segmentée, une électrode à doigts continue, une électrode à doigts segmentée, ou une pluralité d'électrodes boutons disposées sur la périphérie du corps d'outil et intercalées avec un matériau isolant.

25 La figure 8A représente deux petites (à intervalle axial court) électrodes 80 à utiliser sur un outil à induction conformément à un mode de réalisation de l'invention. Comme représenté, l'électrode 80 comprend une pluralité (huit) d'électrodes segmentées (ou
30 d'électrodes boutons) 81 intercalées avec huit sections d'un matériau isolant 82 pour former un anneau qui est

disposé à l'emplacement de sensibilité nulle représenté sur la figure 7. Notez que tandis que cet exemple montre huit électrodes boutons, l'homme du métier apprécierait que d'autres nombres d'électrodes boutons /de sections de matériau isolant peuvent aussi être utilisés. Par conséquent, le nombre particulier d'électrodes boutons et les formes et les tailles des électrodes boutons représentées ne sont pas destinés à limiter l'invention.

10 L'électrode 80 représentée sur la figure 8A conduira des courants du trou de sonde dans le mandrin conducteur (non représenté) via des contacts 81, mais ne conduira pas de courants dans la direction azimutale. Plusieurs variations d'une telle électrode sont
15 possibles, y compris des nombres, des formes et des tailles d'électrodes différents. Comme noté plus haut, l'électrode peut être faite d'une électrode annulaire ou d'une électrode annulaire segmentée, c'est-à-dire, avec des segmentations dans la direction azimutale et
20 les espaces remplis d'un matériau isolant. L'électrode annulaire segmentée ne permettra pas aux courants de circuler dans la direction azimutale. Cela minimise encore l'interférence avec les mesures d'induction. De plus, s'il est souhaitable d'avoir des électrodes avec
25 un intervalle longitudinal plus grand (le long de la direction axiale de l'outil), l'électrode peut être de préférence faite de doigts métalliques.

La figure 8B montre un exemple d'une électrode à doigts qui peut être utilisée avec le mode de
30 réalisation de l'invention. Comme indiqué, une section transversale de l'électrode à doigts 80B comprend un ou

plusieurs fils conducteurs disposés en forme de doigts 81B intercalés avec une pluralité de sections isolantes 82B. Les doigts conducteurs 81B sont connectés au mandrin conducteur (non représenté) par une pluralité
5 de contacts (connecteurs) 83B.

La figure 8C représente une variante d'une électrode à doigts conçue pour permettre au courant de circuler du trou de sonde au mandrin, tout en réduisant au minimum les courants de Foucault dans l'électrode
10 elle-même. Ce mode de réalisation particulier peut être commodément fabriqué à partir d'une feuille conductrice 81C en créant une pluralité d'espaces 82C du sommet et du bas dans un modèle alternatif. Cette variante d'électrode "à doigts" peut être enroulé autour du
15 corps d'outil sans former une circonférence complète (c'est-à-dire, avec au moins un espace) de sorte que le courant ne puisse pas circuler dans la direction azimutale (circonférentielle). Dans ce cas, un seul contact (par exemple, 83B sur la figure 8B) est
20 nécessaire pour créer un chemin conducteur jusqu'au mandrin conducteur intérieur.

La figure 8D montre un autre exemple d'une électrode à doigts. Dans cet exemple, deux jeux de fils conducteurs (doigts) 81D sont imprimés sur un matériau
25 isolant 82D. Un jeu de doigts 81D est relié au sommet, tandis que le deuxième jeu de doigts 81D est relié au bas. Le premier jeu et le deuxième jeu de doigts peuvent être intercalés sans entrer en contact l'un avec l'autre. De nouveau, ce mode de réalisation peut
30 être enroulé autour du corps d'outil, de préférence avec au moins un espace pour éviter les flux de

courants dans la direction azimutale. Cette configuration particulière d'électrode "à doigts" est similaire au blindage de Faraday décrit sur la figure 4 du brevet US 6 667 620, qui est délivré au nom de Homan et al. et cédé au présent déposant. Ce brevet décrit aussi des procédés pour fabriquer de telles électrodes en utilisant des techniques de circuit imprimé. L'homme du métier apprécierait que les électrodes à doigts représentées sur les figures 8B-8D sont à titre d'illustration uniquement et que d'autres modifications sont possibles sans s'écarter de la portée de l'invention. De plus, l'homme du métier apprécierait qu'on peut faire varier l'épaisseur de la feuille conductrice/du fil conducteur qui forme les "doigts" conducteurs et la densité des "doigts", selon des configurations particulières des outils, pour optimiser la réduction des effets de trou de sonde avec interférence minimale avec les mesures EM. En outre, tandis que ces exemples montrent que les "doigts" sont orientés dans la direction longitudinale, il est aussi possible d'avoir les doigts orientés dans une autre direction (par exemple, dans la direction transversale).

Les propriétés d'un outil conformément aux modes de réalisation de l'invention, comme l'outil "à électrodes multiples" représenté sur la figure 7, sont étudiées avec une analyse par éléments finis et comparées avec des outils d'art antérieur. La figure 9 montre des résultats des calculs par éléments finis de réponses dans un milieu homogène (isotrope) pour quatre dispositifs de mesures 27XX, 39XX, 54XX et 72XX sur

trois types d'outils différents : un outil à électrodes multiples, un outil à corps en métal et un outil à corps isolant. Il apparaît de la figure 9 que l'outil à électrodes multiples conformément aux modes de réalisation de l'invention peut produire des mesures essentiellement identiques à celles des outils à induction à corps en métal ou à corps isolant.

La figure 10 montre les réponses d'excentricité des mesures 27XX, 39XX, 54XX et 72XX faites par les trois mêmes types différents d'outils à induction dans un trou de sonde de 21,59 cm (8,5 pouces) de diamètre. La conductivité de la formation est de 50 mS/m et la conductivité de la boue est de 5000 mS/m. Il est clair à partir de la figure 10 que le comportement de l'outil à induction à électrodes multiples est similaire à celui de l'outil à corps en métal dans la plupart des situations. L'outil à électrodes multiples et l'outil à corps en métal sont tous deux plus insensibles à l'excentricité de l'outil que l'outil à corps isolant.

Des dispositifs transversaux sont développés parce qu'ils sont sensibles à la résistivité des formations dans la direction verticale. Une utilisation principale du dispositif transversal est dans la mesure de la résistivité de formations anisotropes. Par conséquent, il est important que l'inclusion d'électrodes multiples ne dégrade pas leur capacité à mesurer la résistivité verticale dans des formations anisotropes. La figure 11 montre les réponses de mesures 27XX, 39XX, 54XX et 72XX dans une formation anisotrope avec l'outil centralisé dans un trou de sonde conducteur de 40,64 cm (16 pouces) de diamètre. L'outil est centralisé dans un trou de

sonde de 16 pouces de diamètre avec une conductivité de boue de 5000 mS/m. La conductivité horizontale de la formation est de 500 mS/m. Le rapport de la résistivité verticale (R_v) par rapport à la résistivité horizontale (R_h), R_v/R_h , varie de 1 à 10 dans cette étude. Les réponses d'anisotropie de l'outil à électrodes multiples sont conservées, et sont proches de celles d'un outil à corps en métal.

La figure 11 montre que l'outil à électrodes multiples est utile pour mesurer les résistivités dans une formation anisotrope quand l'outil est centré dans le trou de sonde. Pour être utile, la capacité de ces outils pour mesurer la résistivité anisotrope ne devrait pas être dégradée par l'excentricité de l'outil.

La figure 12 montre les réponses des mesures 27XX, 39XX, 54XX et 72XX dans une formation anisotrope avec trois types d'outils décentralisés de 10,16 cm (4 pouces) le long de la direction y dans un trou de sonde conducteur de 40,64 cm (16 pouces) de diamètre ayant une conductivité de boue de 5000 mS/m. La conductivité horizontale de la formation est de 500 mS/m. Le rapport R_v/R_h varie de 1 à 10 dans cette étude. Les réponses d'anisotropie de l'outil à électrodes multiples sont semblables à celles de l'outil à corps en métal.

L'outil à électrodes multiples et l'outil à corps en métal sont tous deux sensibles à une plage plus large d'anisotropie, en comparaison avec l'outil à corps isolant. L'outil à corps isolant excentré ne pouvait pas donner une indication fiable de R_v/R_h comme on peut le voir en comparant les figures 11 et 12.

Effet de trou de sonde sur la réponse verticale

Dans une diagraphie d'induction de dispositif typique (par exemple, une diagraphie AIT), des corrections de trou de sonde sont appliquées en supposant un milieu homogène à l'extérieur du trou de sonde. Voir par exemple, le brevet U.S. N° 5 041 975 délivré au nom de Minerbo et al. Une question importante est de savoir si l'effet de trou de sonde peut être séparé de la réponse verticale de l'outil (par exemple, des effets de couche formant épaulement). Les effets de couche formant épaulement se produisent dans des formations de couches minces, particulièrement quand les couches adjacentes sont plus conductrices que la couche à l'étude. Les effets de couche formant épaulement conduisent à des lectures erronées qui nécessitent d'être corrigées avant qu'une résistivité de formation précise puisse être déduite des mesures.

La figure 13 montre les réponses des mesures 39XX de trois types différents d'outils dans un milieu homogène (50 mS/m) et dans une formation à trois couches sans trou de sonde. La formation à trois couches comprend une couche de 3,657 m (12 pieds) ayant une conductivité de 50 mS/m, prise en sandwich entre deux couches ayant une conductivité de 1000 mS/m. Les résultats montrés sont calculés par des calculs par éléments finis. Comme indiqué sur la figure 13, tandis que tous les trois types d'outils produisent une conductivité précise (environ 50 mS/m) dans la formation homogène, les lectures d'outil (environ 130 mS/m) sont toutes significativement influencées par la présence de couches plus conductrices au-dessus et

en dessous de la couche d'intérêt (la couche de 3,657 m [12 pieds]).

Les effets de couche formant épaulement, comme indiqué sur la figure 13, peuvent compliquer significativement les mesures, en particulier en présence d'une excentricité de l'outil. La figure 14 montre les réponses d'excentricité de dispositifs 39XX dans trois types d'outils à induction différents dans un trou de sonde avec et sans les couches formant épaulement. La formation homogène a une conductivité de 50 mS/m. Le modèle de formation à trois couches (modèle à couche formant épaulement) a une couche mince de 3,657 m (12 pieds) (50 mS/m), prise en sandwich entre des couches plus conductrices (1000 mS/m). Le trou de sonde de 40,64 cm (16 pouces) est rempli de boue ayant une conductivité de 5000 mS/m.

Comme indiqué sur la figure 14, l'outil isolant (courbes 1, 2) est significativement affecté par les effets d'excentricité, indépendamment des types de formation. Notez que les effets de couche formant épaulement ajoutent la quantité différente de lectures à la mesure selon l'excentricité de l'outil, c'est-à-dire, la différence entre la courbe 1 et la courbe 2 devient plus prononcée à mesure que l'excentricité de l'outil augmente. En revanche, l'outil à corps en métal (courbes 5, 6) et l'outil à électrodes multiples (courbes 3, 4) sont moins affectés par les effets de couche formant épaulement et les effets de couche formant épaulement semblent constants, quelle que soit l'excentricité de l'outil. Ainsi, un outil à électrodes multiples conformément aux modes de réalisation de

l'invention produira des mesures plus fiables qu'un outil à corps isolant et les effets de couche formant épaulement seront plus faciles de corriger.

La figure 15 montre les résultats à partir des
5 corrections des effets de couche formant épaulement de résultats montrés sur la figure 14. Comme indiqué, les réponses d'excentricité des mesures 39XX pour les trois types différents d'outils à induction sont représentées avec et sans correction d'effet de couche formant
10 épaulement. La courbe 1 montre la réponse de l'outil à corps isolant avec la correction d'effet de couche formant épaulement, tandis que la courbe 2 montre la mesure à partir du même outil dans une formation homogène. Il est apparent que l'effet de couche formant
15 épaulement ne peut pas être correctement supprimé à travers l'excentricité d'outils différents, c'est-à-dire, la courbe 1 est différente de la courbe 2. Autrement dit, les effets d'excentricité et les effets de couches formant épaulement ne sont pas facilement
20 séparables avec un outil à corps isolant. En revanche, les courbes (courbes 3, 5) après correction de couche formant épaulement sont superposables avec les courbes correspondantes pour les mesures de formations homogènes (courbes 4,6) pour l'outil à électrodes
25 multiples et l'outil à corps en métal. Ce résultat indique que l'effet d'excentricité et l'effet de couche formant épaulement sont approximativement séparables pour l'outil à électrodes multiples et l'outil à corps en métal, mais pas pour l'outil à corps isolant.

Vérification expérimentale

Les simulations ci-dessus montrent qu'un outil à induction à électrodes multiples conformément aux modes de réalisation de l'invention produisent des mesures
5 similaires à celles d'un outil à corps en métal. Les mesures d'un outil à électrodes multiples sont moins influencées par les effets d'excentricité de l'outil (effets de trou de sonde) ou de couche formant épaulement, en comparaison avec les mesures d'un outil
10 à corps isolant. Ces résultats de calcul ont été vérifiés dans des mesures de laboratoire sur des outils réels basés sur cette conception.

Un prototype expérimental similaire au modèle à électrodes multiples (par exemple, l'outil représenté
15 sur la figure 7) a été construit et testé dans un grand réservoir rempli d'eau du robinet (79,2 mS/m). Ce prototype a 8 électrodes courtes. Le trou de sonde a été simulé par un tuyau en plastique conducteur, comme du TIVAR™ 1000 de Poly Hi Dolidur (Fan Wayne, IN),
20 rempli d'eau salée (6,16 S/m). Le diamètre interne du tuyau en plastique est de 33,02 cm (13 pouces).

La figure 16 montre un modèle à différence finie d'un outil prototype expérimental conformément à un mode de réalisation de l'invention. Le prototype a été
25 conçu avec SLDMCYL, un simulateur électromagnétique cylindrique 3D à différence finie développé chez Schlumberger. L'électrode entre les bobines de récepteur à 38,1 et 53,34 cm (15 et 21 pouces) a été omise, et le prototype a deux électrodes entourant
30 l'émetteur, au lieu de quatre. Les électrodes à doigts, du type représenté sur la figure 8A, sont modélisées

comme des coquilles cylindriques anisotropes (magenta) ayant une conductivité zéro dans la direction azimutale, et une haute conductivité dans les directions axiales et radiales. Elles sont reliées au conducteur central (orange) par des disques anisotropes (cyan) ayant une conductivité zéro dans les directions axiales et azimutales. Cette représentation des électrodes est similaire, mais pas équivalente, au modèle d'électrode segmenté sur la figure 8A.

10 La modélisation indique que les réponses sont non affectées par la résistance des doigts et des disques pour une plage raisonnable de résistance. Une bonne concordance entre les mesures et les calculs a été obtenue pour les récepteurs 68,58 cm (27") (figure 17) ainsi que 99,06 cm (39") (figure 18). Ces tests ont confirmé que les codes de modélisation prévoient correctement la réduction des effets de trou de sonde.

La figure 19 représente un modèle de différence finie d'un prototype similaire avec neuf électrodes courtes. L'électrode entre les bobines de récepteur à 38,1 et 53,34 cm (15 et 21 pouces) a été incluse dans ce prototype. Le prototype a été testé dans un tuyau conducteur (tuyau en TIVAR™) ayant un diamètre approximativement de 20,06 cm (7,9 pouces) et rempli d'eau salée avec une conductivité de 5,68 S/m. La conductivité de réservoir était de 56,8 mS/m dans ce cas. Les réponses mesurées et calculées pour l'espacement de 68,58 cm (27 pouces) sont indiquées sur la figure 20. Dans le tuyau de 20,06 cm (7,9 pouces) de diamètre, la géométrie ne peut pas être contrôlée aussi exactement que dans le tuyau de 33,02 cm (13 pouces),

aussi la concordance sur la figure 20 n'est-elle pas aussi proche que celle sur la figure 17.

La figure 21 montre des réponses provenant d'une autre variante avec cinq électrodes d'un pouce et quatre électrodes à doigts de 7,62 cm (3 pouces) près de l'émetteur. Une concordance suffisamment proche entre les résultats calculés et expérimentaux est obtenue pour les récepteurs 68,58 cm (27") (figure 22). Cette conception donne des réponses de 27XX et 27YY qui sont pratiquement indépendantes de l'excentricité pour ce diamètre de trou de sonde.

La description ci-dessus montre clairement que les outils à induction peuvent être conçus pour être plus "résistants" aux effets de trou de sonde. La figure 23 résume un procédé pour concevoir un outil à induction conformément à un mode de réalisation de l'invention. Comme indiqué, un procédé 230 peut commencer par la conception d'un outil à induction classique (étape 231). L'outil à induction classique peut être un outil à dispositifs multiples, comme l'AIT™, qui comprend typiquement un émetteur commun et une pluralité de récepteurs et les bobines de compensation correspondantes espacées par rapport à l'émetteur. Certains outils à induction peuvent comprendre plus d'un émetteur et d'autres peuvent comprendre des électrodes pour les mesures de résistivité de formations peu profondes. Notez que l'outil peut comprendre des dispositifs ayant des bobines à dipôles magnétiques longitudinaux, des bobines à dipôles magnétiques transversaux, des bobines inclinées, ou des bobines à trois axes.

Basé sur la conception des outils à induction, les emplacements de sensibilité nulle (z_0) peuvent être calculés aux moyens harmoniques de l'espacement entre l'émetteur et la bobine de compensation (z_B) et de l'espacement entre l'émetteur et le récepteur (z_R) (étape 232). Chaque emplacement de sensibilité nulle est entre une bobine de récepteur principal et la bobine de compensation reliée en série à celle-ci.

Enfin, une ou plusieurs électrodes peuvent être comprises sur l'outil à induction à un ou plusieurs emplacements proches des emplacements de sensibilité nulle (étape 233). De plus, une électrode supplémentaire (ou des électrodes multiples) peut être comprise au-delà du dernier récepteur, placée de préférence à un emplacement symétrique par rapport à la dernière électrode (ou aux électrodes multiples). En outre, comme indiqué plus haut, des électrodes supplémentaires peuvent être comprises autour de l'émetteur (étape 234), et en dessous du récepteur le plus bas (étape 235), pour réduire encore les effets de trou de sonde.

Notez que des modes de réalisation préférés utilisent des électrodes multiples (comme les électrodes à doigts) ; cependant, certains modes de réalisation peuvent comprendre des électrodes seules (comme une électrode bouton ou une électrode annulaire ayant des espaces isolants pour interrompre la conductivité azimutale). Notez en outre que la description ci-dessus utilise des dispositifs transversaux pour illustrer les problèmes associés aux effets de trou de sonde. Il est clair que les modes de

réalisation de l'invention peuvent efficacement supprimer/réduire les effets de trou de sonde dans les dispositifs transversaux. Cependant, l'homme du métier apprécierait que les modes de réalisation de l'invention peuvent aussi être utilisés avec des dispositifs longitudinaux, des dispositifs à antennes inclinées, ou des dispositifs à trois axes. Les modes de réalisation de l'invention sont applicables à un outil à câble, un outil à diaggraphie en cours de forage (LWD), ou un outil de mesure en cours de forage (MWD).

Les avantages des modes de réalisation de l'invention comprennent un ou plusieurs des points suivants. Les modes de réalisation de l'invention proposent des procédés pour annuler les effets importants de trou de sonde qui contaminent les mesures de l'induction transversale ou sur trois axes. Cette technique d'annulation est compatible avec la construction mécanique d'une sonde à induction à câble, et a un impact minimal sur les mesures d'induction coaxiales classiques.

Les modes de réalisation de l'invention proposent une formule approximative pour la position de sensibilité nulle où une petite électrode (ou un anneau d'électrodes multiples ou d'électrodes à doigts) peut être placée entre une bobine de récepteur principal et la bobine de compensation reliées en série.

Les propriétés d'un outil conformément aux modes de réalisation de l'invention sont similaires à celles d'un outil à corps en métal en ce qui concerne (1) la réponse d'un milieu homogène, (2) la réponse d'anisotropie, (3) les effets d'excentricité de trou de

sonde et (4) la séparabilité de la réponse verticale et des effets de trou de sonde.

Tandis que l'invention a été décrite par rapport à un nombre limité de modes de réalisation, l'homme du
5 métier, ayant l'avantage de cette présentation, appréciera que d'autres modes de réalisation peuvent être conçus qui ne s'écartent pas de la portée de l'invention telle que décrite ici. En conséquence, la portée de l'invention devrait être limitée seulement
10 par les revendications annexées.

REVENDICATIONS

1. Outil à induction, caractérisé en ce qu'il comprend :

un mandrin conducteur (M) ;

au moins un dispositif comprenant un émetteur (T),
5 une bobine de compensation (B27), et un récepteur (R27)
disposés dans un corps d'outil (B) isolant entourant le
mandrin conducteur (M) ; et

une électrode (2) disposée dans le corps d'outil
(B) isolant à un emplacement choisi entre la bobine de
10 compensation (B27) et le récepteur (R27), dans lequel
l'emplacement choisi est espacé de l'émetteur (T) d'une
distance correspondant approximativement à une moyenne
harmonique d'une distance entre l'émetteur (T) et la
bobine de compensation (B27) et d'une distance entre
15 l'émetteur (T) et le récepteur (R27), et dans lequel
l'électrode (2) comprend un contact formant un chemin
conducteur jusqu'au mandrin conducteur (M).

2. Outil à induction selon la revendication 1,
20 dans lequel au moins un dispositif comprend un
dispositif transversal ou un dispositif à trois axes.

3. Outil à induction selon la revendication 1,
dans lequel l'électrode (2) disposée entre la bobine de
25 compensation (B27) et le récepteur (R27) est choisie à
partir d'une électrode annulaire, d'une électrode
annulaire segmentée, d'une électrode à doigts, et d'une
pluralité d'électrodes boutons agencées autour d'une
circonférence du corps d'outil (B) isolant.

4. Outil à induction selon la revendication 1, dans lequel la moyenne harmonique est calculée selon :

5

$$z_o = \frac{2}{\frac{1}{z_B} + \frac{1}{z_R}}$$

où z_o est la distance correspondant à la moyenne harmonique, z_B et z_R sont les distances de l'émetteur (T) à la bobine de compensation (B27) et au récepteur (R27),
10 respectivement.

5. Outil à induction selon la revendication 1, comprenant en outre une électrode supplémentaire (E7) disposée dans le corps d'outil isolant à une distance
15 au-delà d'un récepteur (R72) ayant un espacement le plus long par rapport à l'émetteur (T), dans lequel l'électrode supplémentaire comprend un conducteur qui entre en contact avec le mandrin conducteur.

20 6. Outil à induction selon la revendication 1, comprenant en outre une paire d'électrodes (T2, T3) disposées dans le corps d'outil isolant sensiblement symétriques de part et d'autre de l'émetteur (T), dans lequel les électrodes de la paire d'électrodes
25 comprennent chacune un conducteur qui entre en contact avec le mandrin conducteur.

7. Outil à induction selon la revendication 6, comprenant en outre une électrode supplémentaire (E7)
30 disposée dans le corps d'outil isolant à une distance

au-delà d'un récepteur (R72) ayant un espacement le plus long par rapport à l'émetteur (T), dans lequel l'électrode supplémentaire comprend un conducteur qui entre en contact avec le mandrin conducteur.

5

8. Outil à induction selon la revendication 6, comprenant en outre une deuxième paire d'électrodes (T1, T4) disposées dans le corps d'outil isolant sensiblement symétriques de part et d'autre de l'émetteur (T), dans lequel les électrodes de la deuxième paire d'électrodes comprennent chacune un conducteur qui entre en contact avec le mandrin conducteur.

9. Outil à induction selon la revendication 8, comprenant en outre une électrode supplémentaire (E7) disposée dans le corps d'outil isolant à une distance au-delà d'un récepteur (R72) ayant un espacement le plus long par rapport à l'émetteur (T), dans lequel l'électrode supplémentaire (E7) comprend un conducteur qui entre en contact avec le mandrin conducteur.

10. Procédé pour concevoir un outil à induction, caractérisé en ce qu'il comprend :

la disposition d'au moins un dispositif comprenant un émetteur (T), une bobine de compensation (B27) et un récepteur (R27) dans un corps d'outil (B) isolant entourant un mandrin conducteur (M) de l'outil à induction ;

la détermination d'un emplacement de sensibilité nulle, dans lequel l'emplacement de sensibilité nulle

est situé à une moyenne harmonique d'une distance entre l'émetteur (T) et la bobine de compensation (B27) et d'une distance entre l'émetteur (T) et le récepteur (R27) ; et

5 la disposition d'une électrode (2) dans le corps d'outil (B) isolant à proximité de l'emplacement de sensibilité nulle, dans lequel un chemin conducteur est formé entre l'électrode (2) et le mandrin conducteur (M).

10

11. Procédé selon la revendication 10, dans lequel au moins un dispositif comprend un dispositif transversal ou un dispositif à trois axes.

15 12. Procédé selon la revendication 10, dans lequel l'électrode est choisie à partir d'une électrode annulaire, d'une électrode annulaire segmentée, d'une électrode à doigts et d'une pluralité d'électrodes boutons disposées autour d'une circonférence du corps
20 d'outil(B) isolant.

13. Procédé selon la revendication 10, caractérisé en ce que la moyenne harmonique est calculée selon :

25

$$z_o = \frac{2}{\frac{1}{z_B} + \frac{1}{z_R}}$$

où z_o est la distance correspondant à la moyenne harmonique, z_B et z_R sont des distances de l'émetteur à la bobine de compensation et au récepteur,
30 respectivement.

14. Procédé selon la revendication 10, comprenant en outre la disposition d'une électrode supplémentaire (E7) dans le corps d'outil isolant à une distance au-delà d'un récepteur (R72) ayant un espacement le plus long de l'émetteur (T), dans lequel l'électrode supplémentaire comprend un conducteur qui entre en contact avec le mandrin conducteur.

15. Procédé selon la revendication 10, comprenant en outre la disposition d'une paire d'électrodes (T2, T3) dans le corps d'outil isolant sensiblement symétriques de part et d'autre de l'émetteur (T), dans lequel les électrodes de la paire d'électrodes comprennent chacune un conducteur qui entre en contact avec le mandrin conducteur.

16. Procédé selon la revendication 15, comprenant en outre la disposition d'une électrode supplémentaire (E7) dans le corps d'outil isolant à une distance au-delà d'un récepteur (R72) ayant un espacement le plus long par rapport à l'émetteur (T), dans lequel l'électrode supplémentaire (E7) comprend un conducteur qui entre en contact avec le mandrin conducteur.

17. Procédé selon la revendication 15, comprenant en outre la disposition d'une deuxième paire d'électrodes (T1, T4) dans le corps d'outil isolant sensiblement symétriques de part et d'autre de l'émetteur (T), dans lequel les électrodes de la deuxième paire d'électrodes comprennent chacune un

conducteur qui entre en contact avec le mandrin conducteur.

18. Procédé de la revendication 17, comprenant en outre la disposition d'une électrode supplémentaire (E7) dans le corps d'outil isolant à une distance au-delà d'un récepteur (R72) ayant un espacement le plus long par rapport à l'émetteur (T), dans lequel l'électrode supplémentaire (E7) comprend un conducteur qui entre en contact avec le mandrin conducteur.

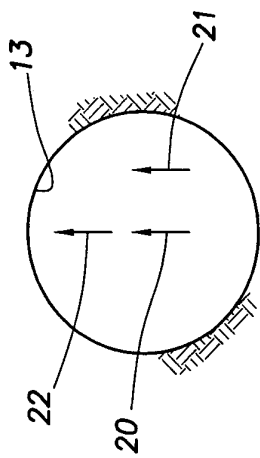


FIG. 1a

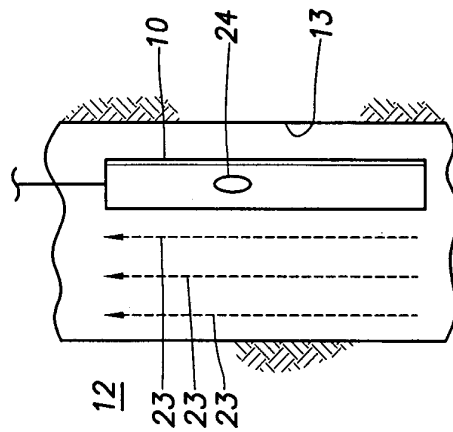


FIG. 1b

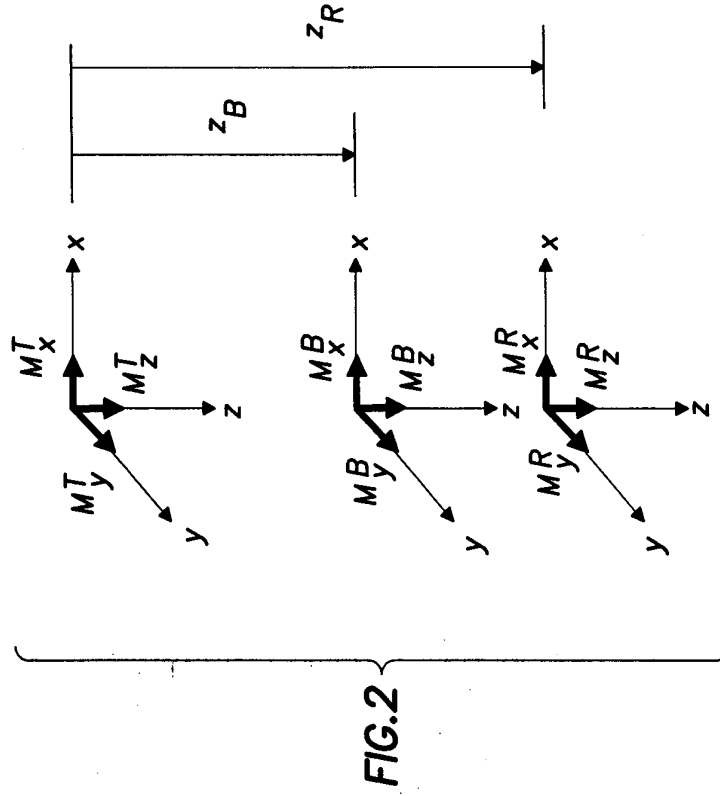


FIG. 2

2/20

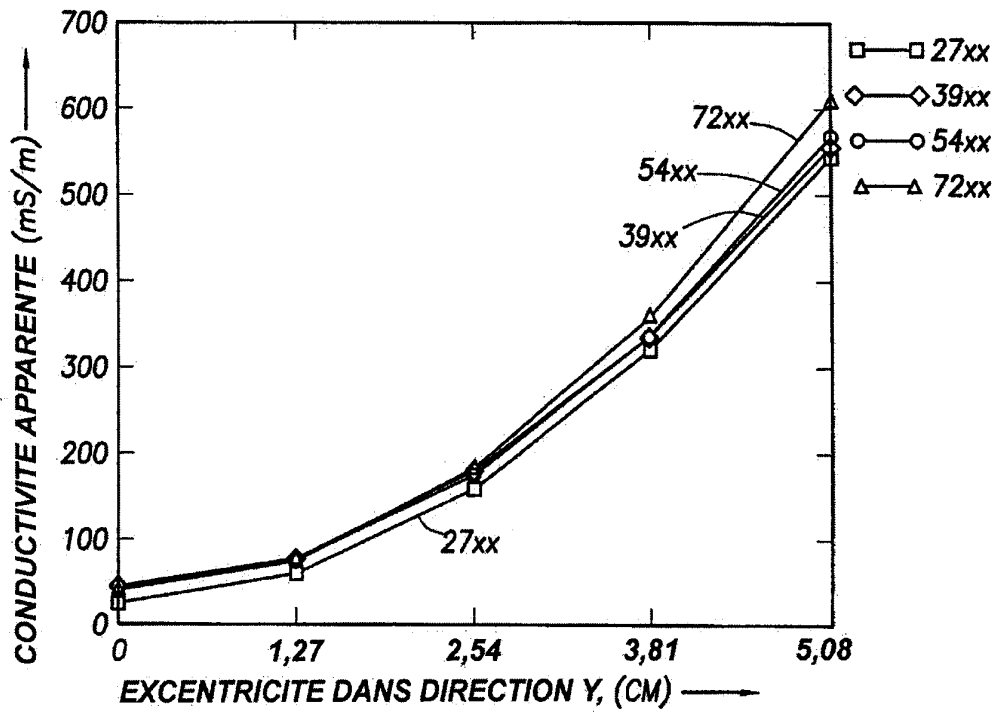


FIG.3

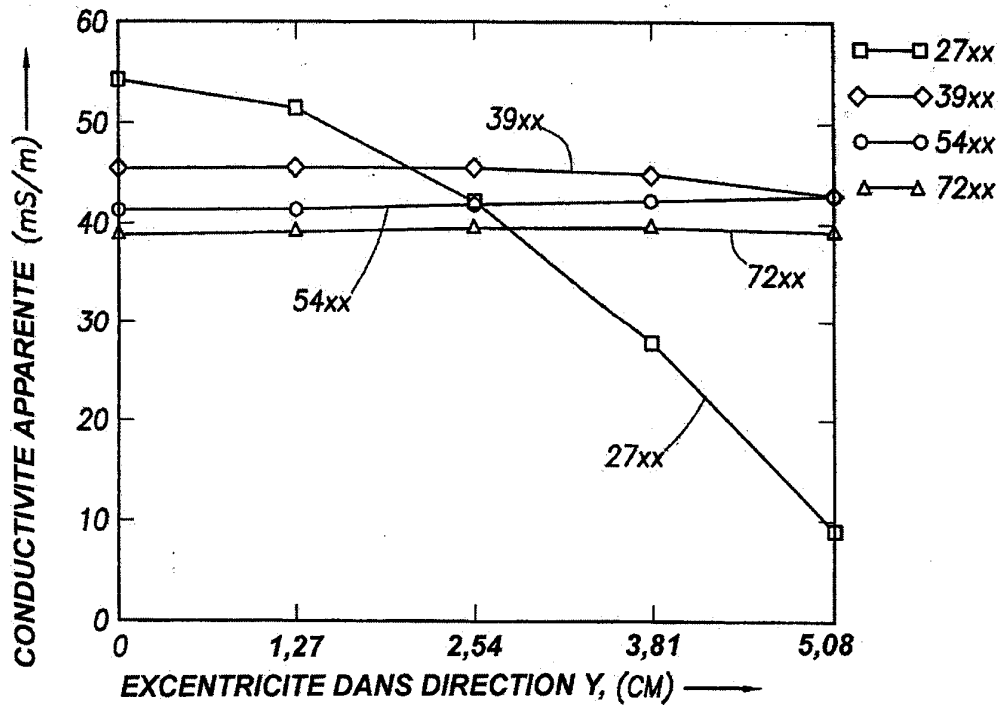


FIG.4

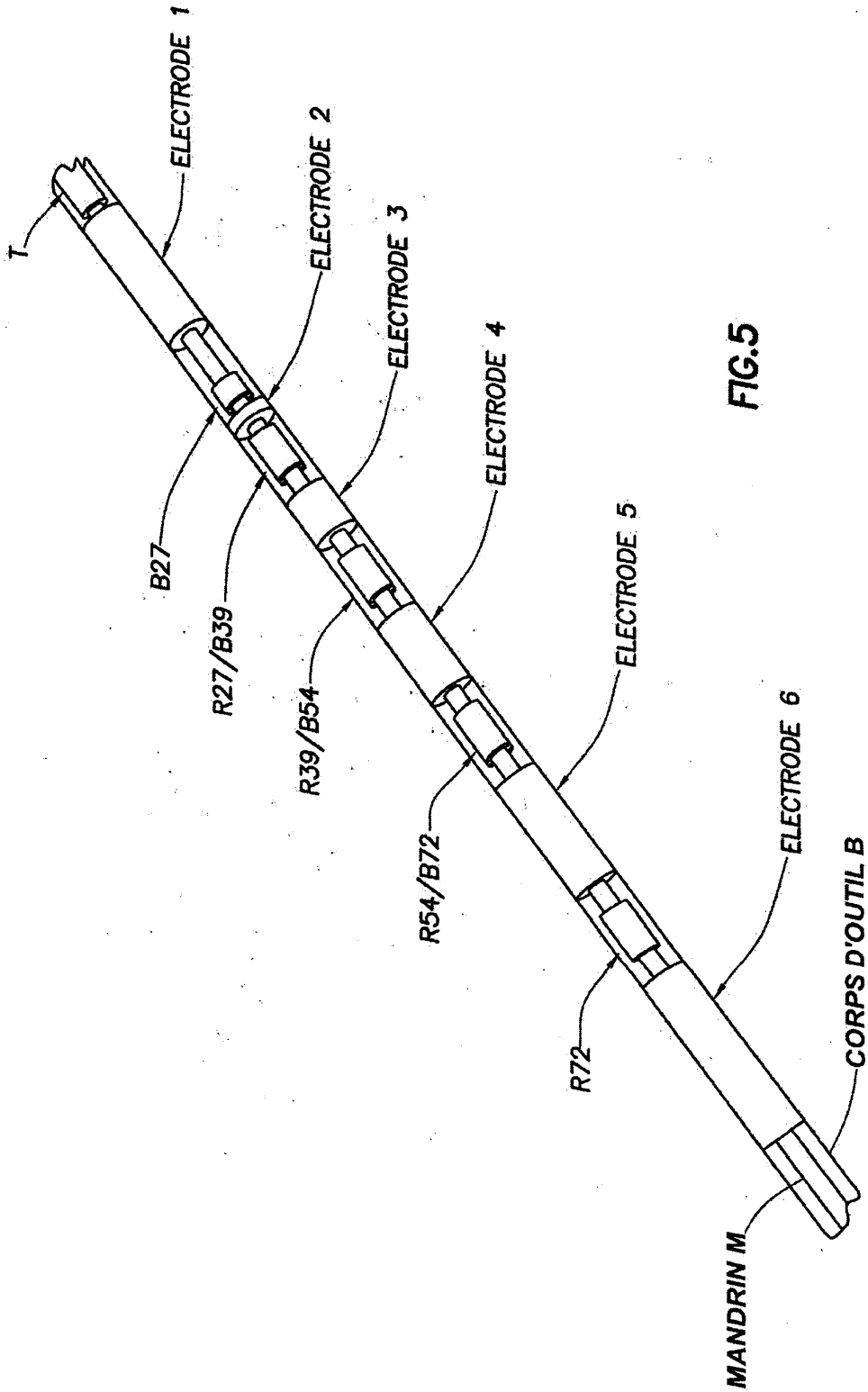


FIG. 5

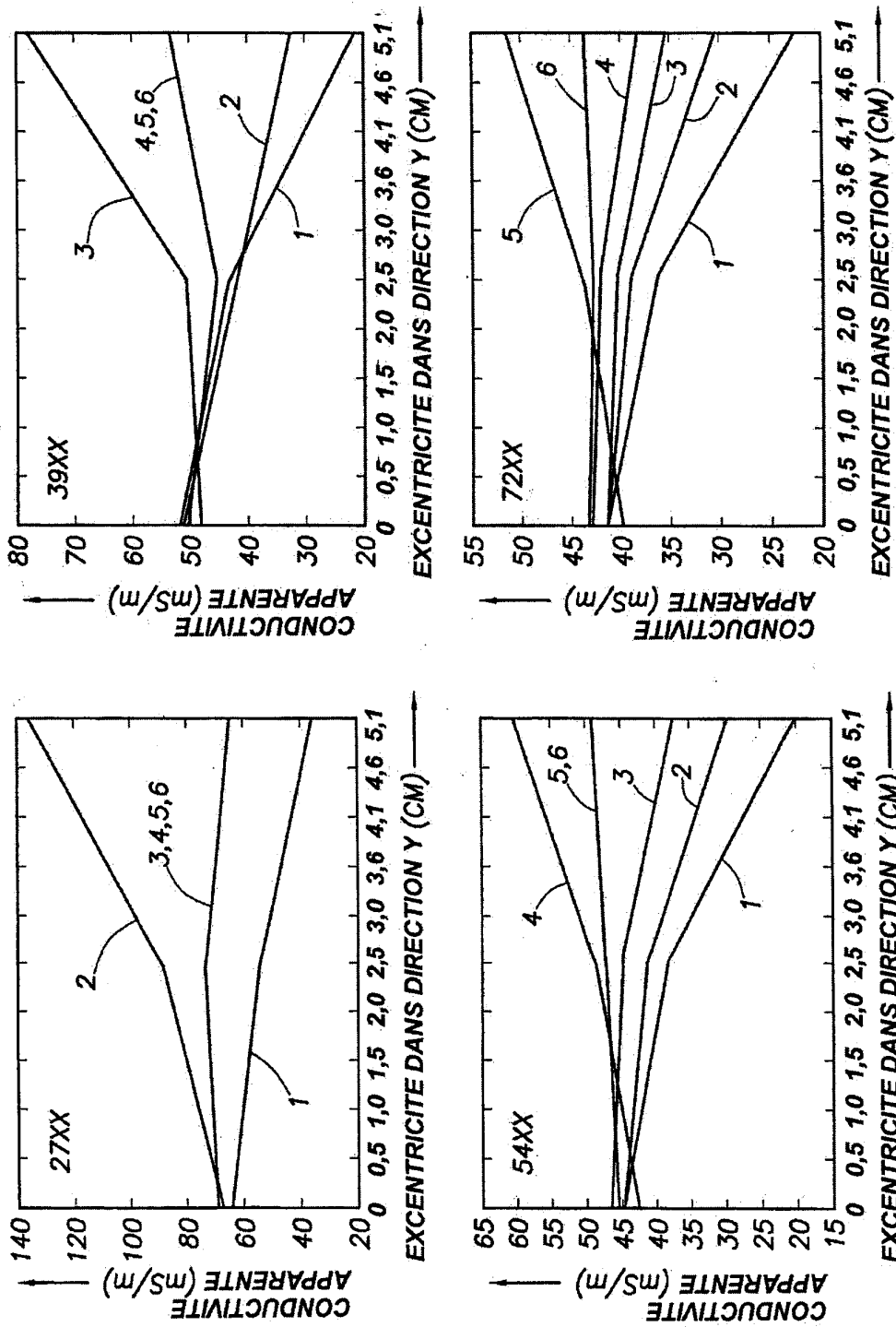


FIG. 6

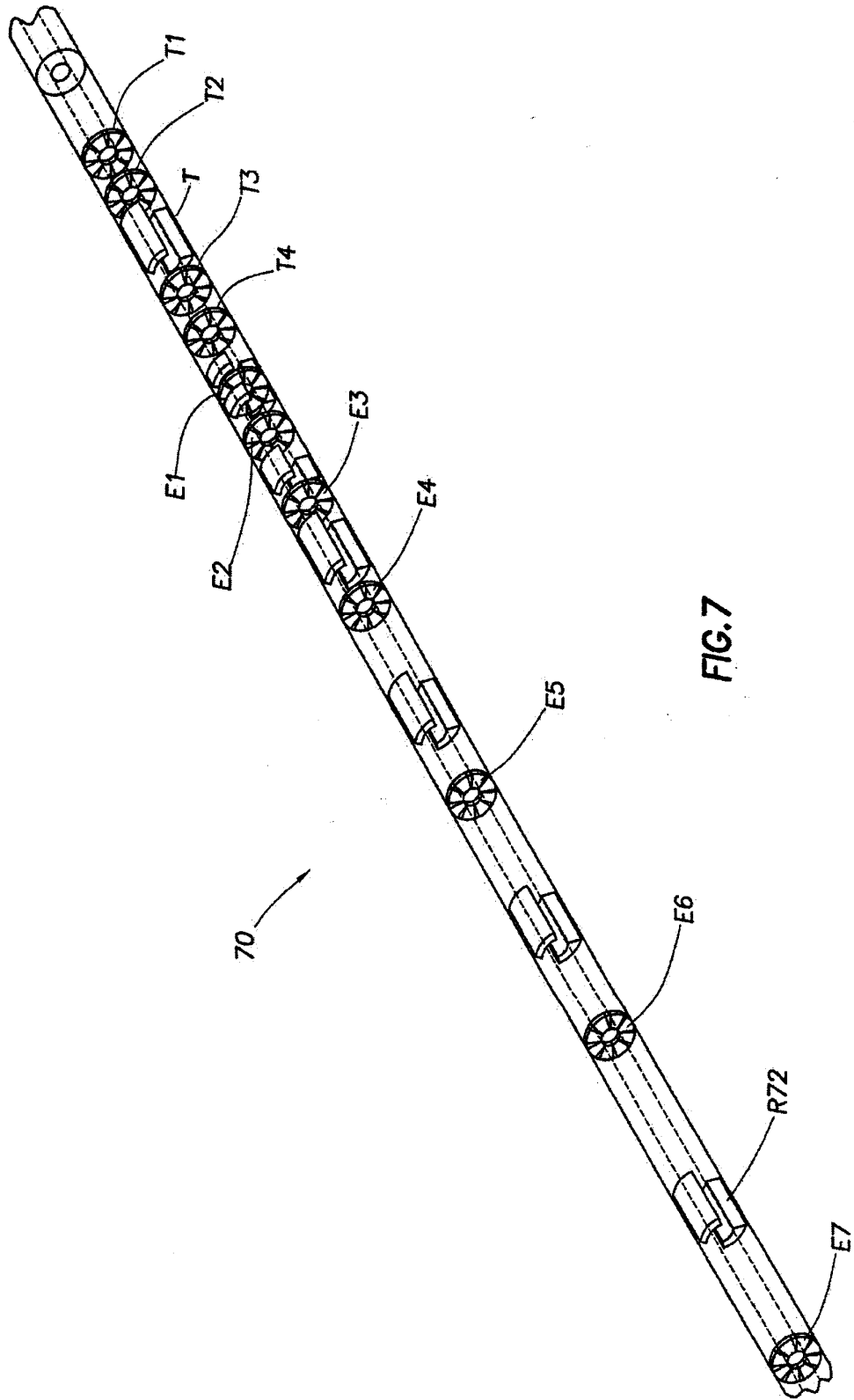


FIG. 7

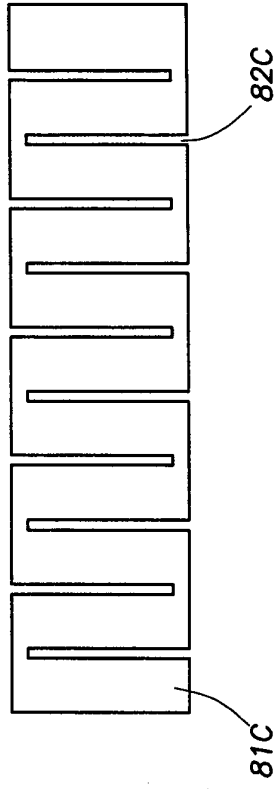
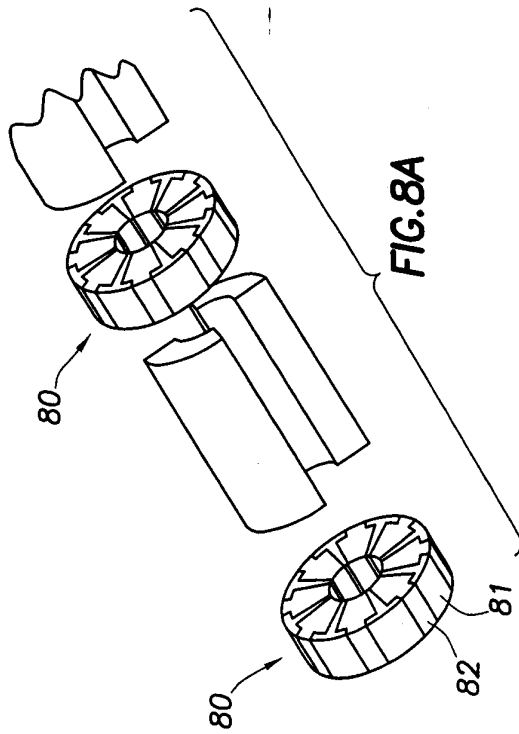


FIG. 8C

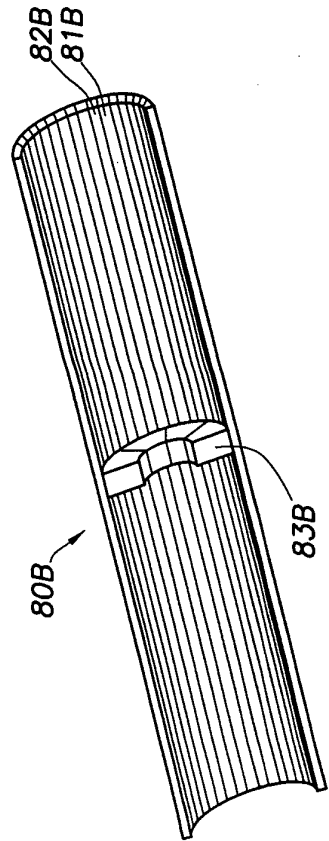


FIG. 8B

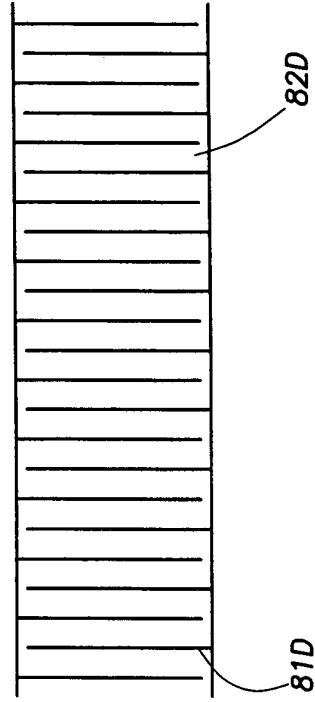


FIG. 8D

7/20

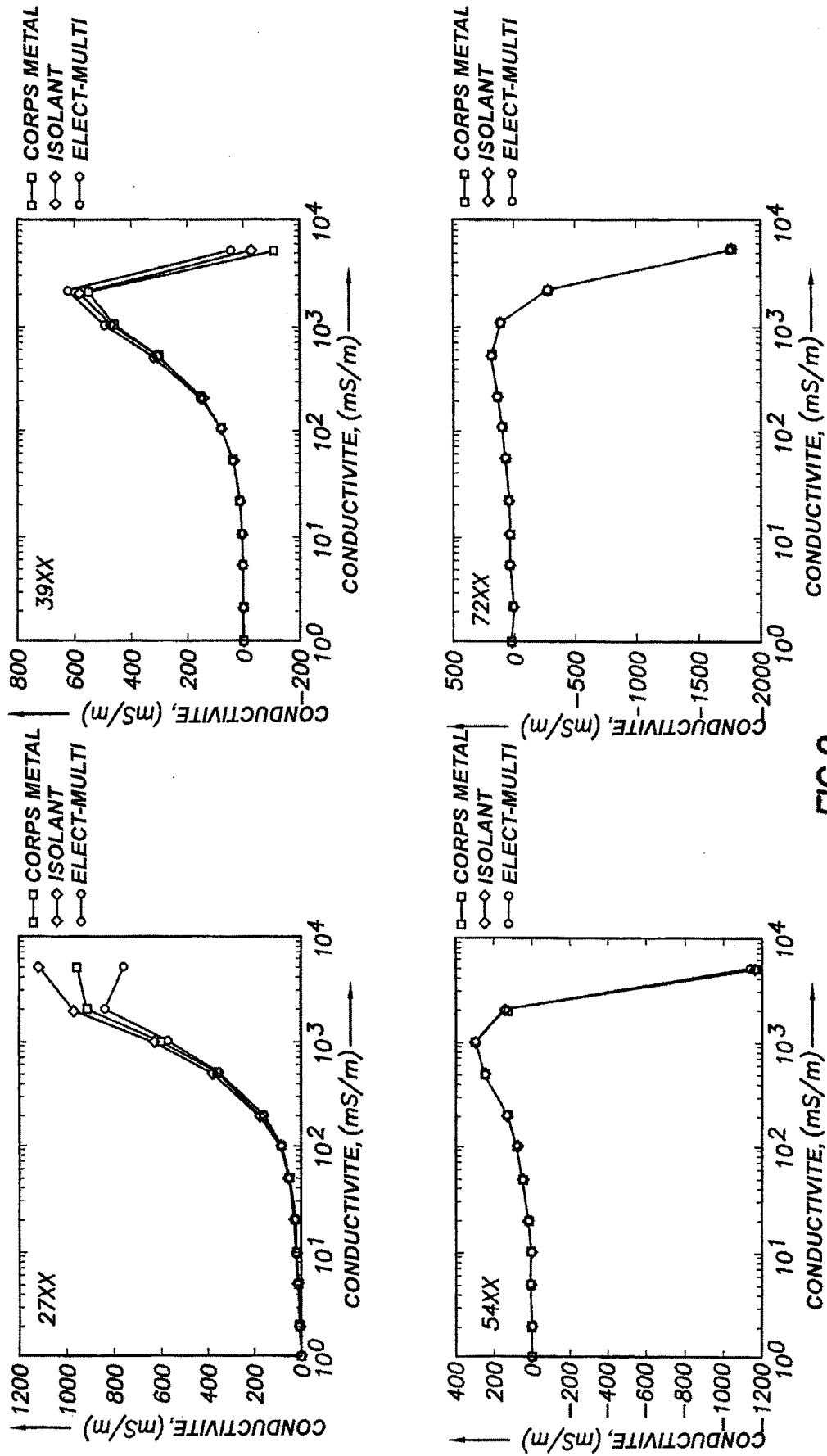


FIG.9

8/20

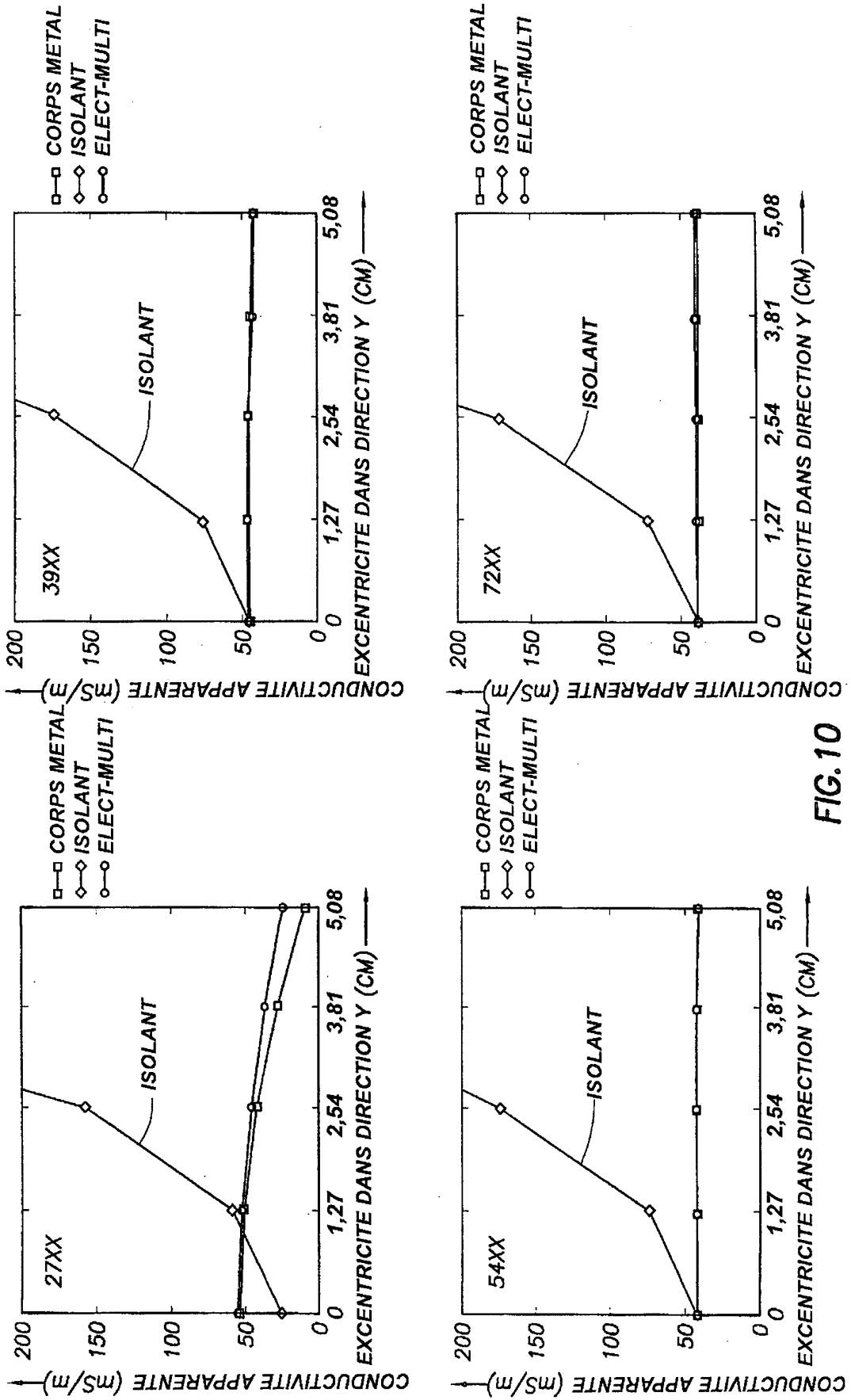


FIG. 10

9/20

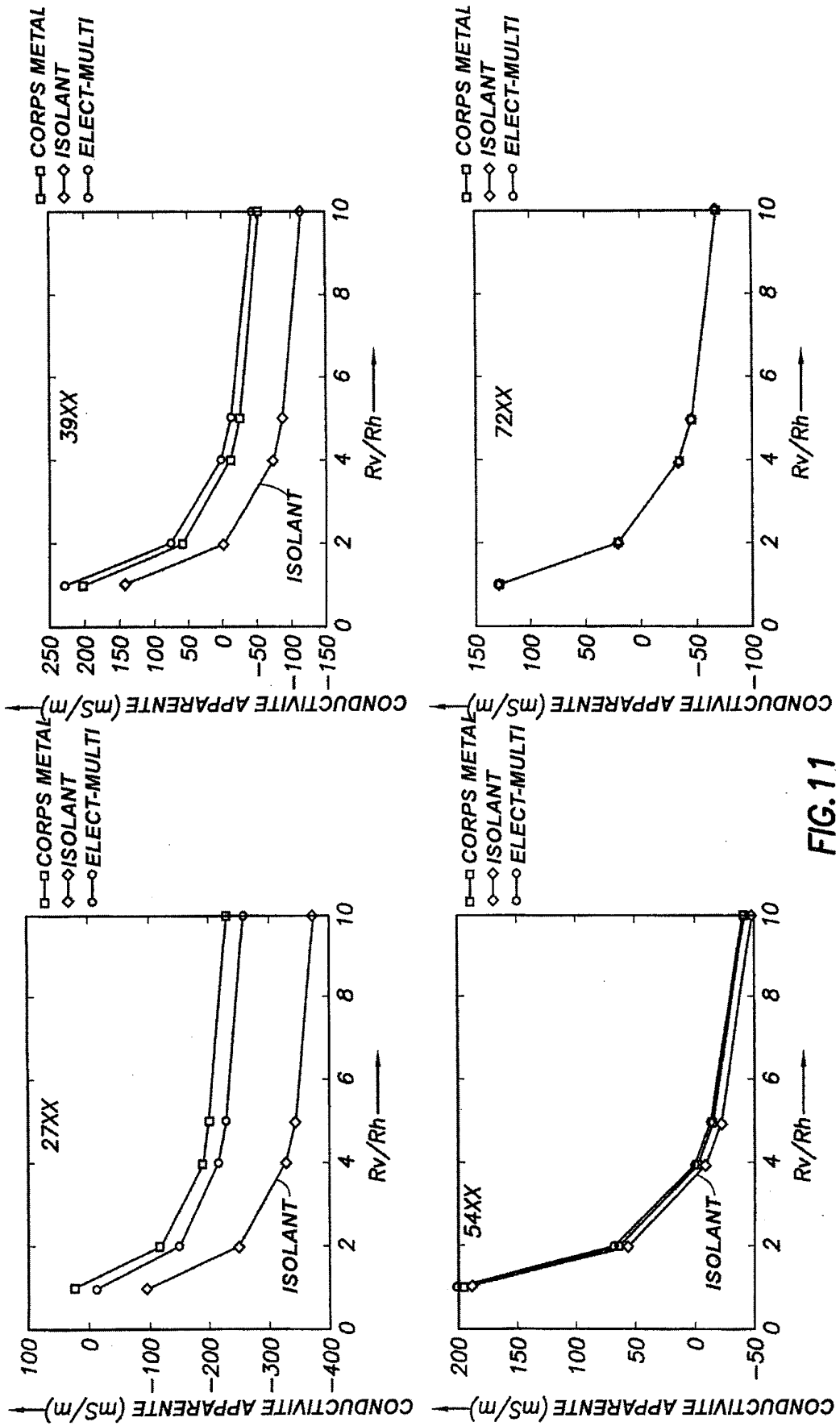


FIG. 11

10/20

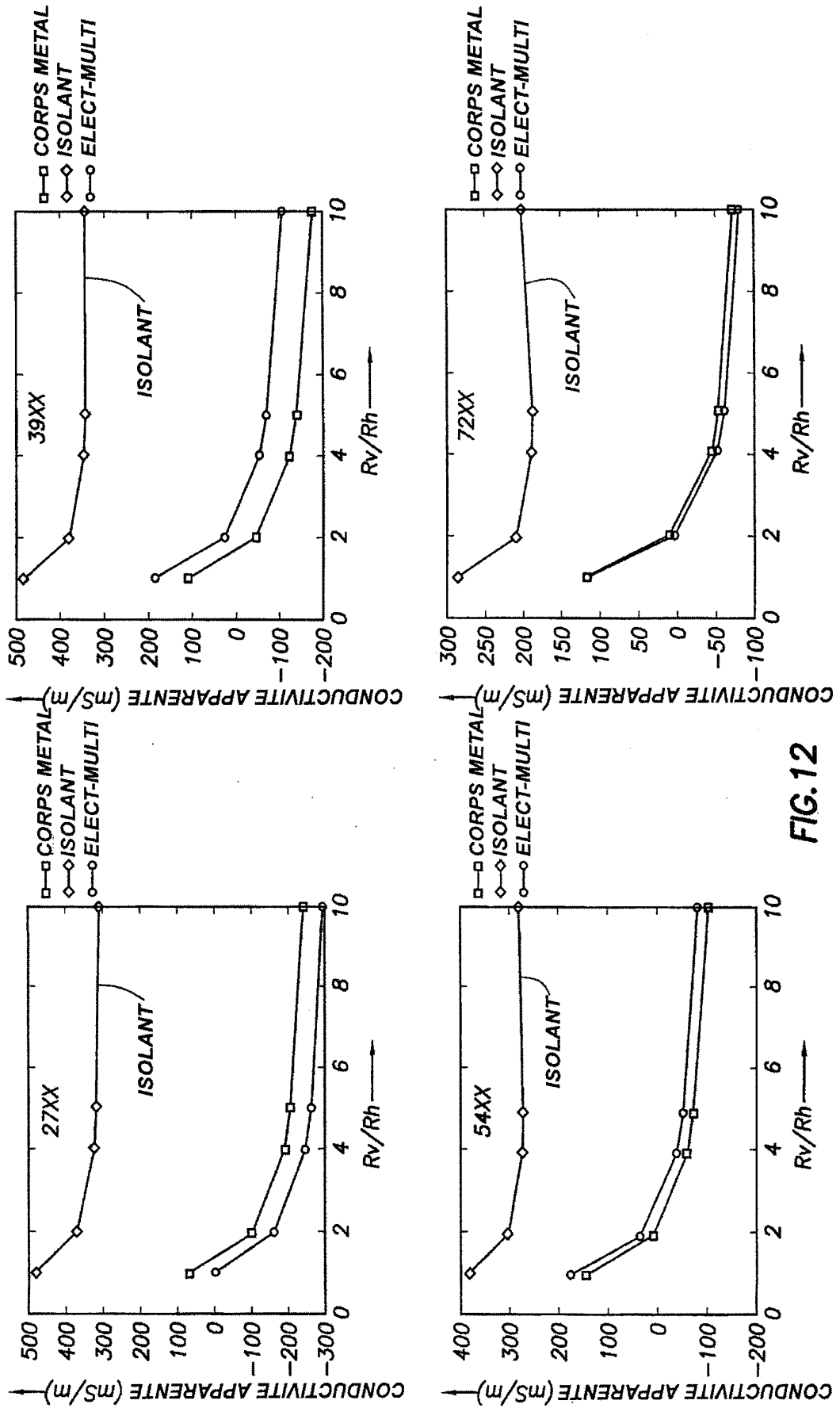


FIG. 12

11/20

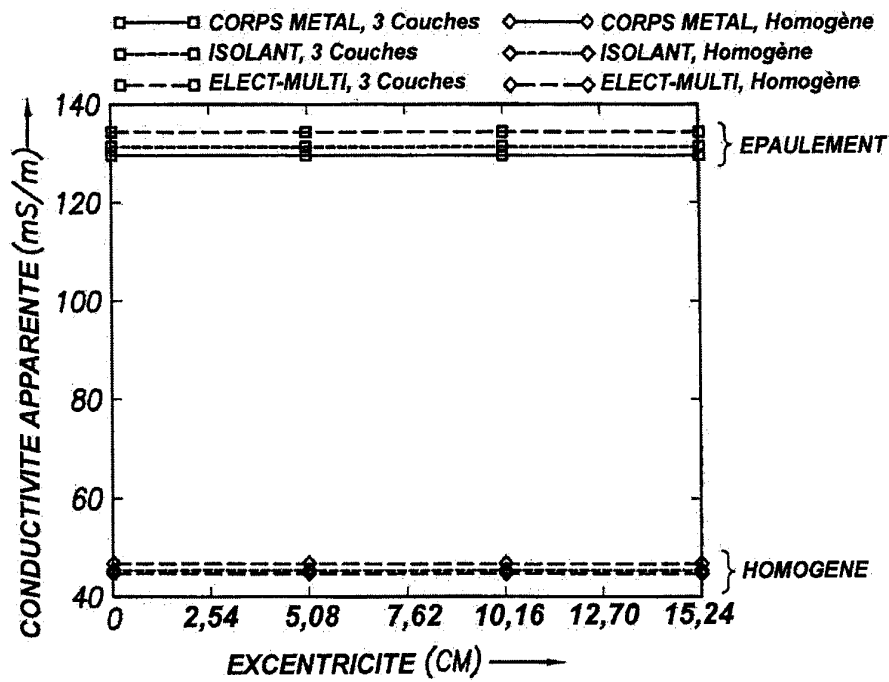


FIG. 13

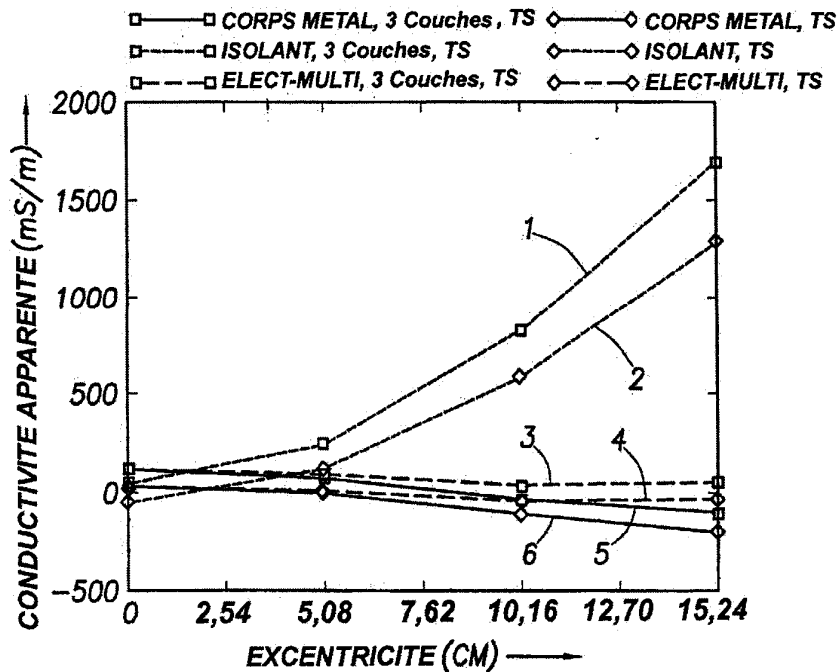


FIG. 14

12/20

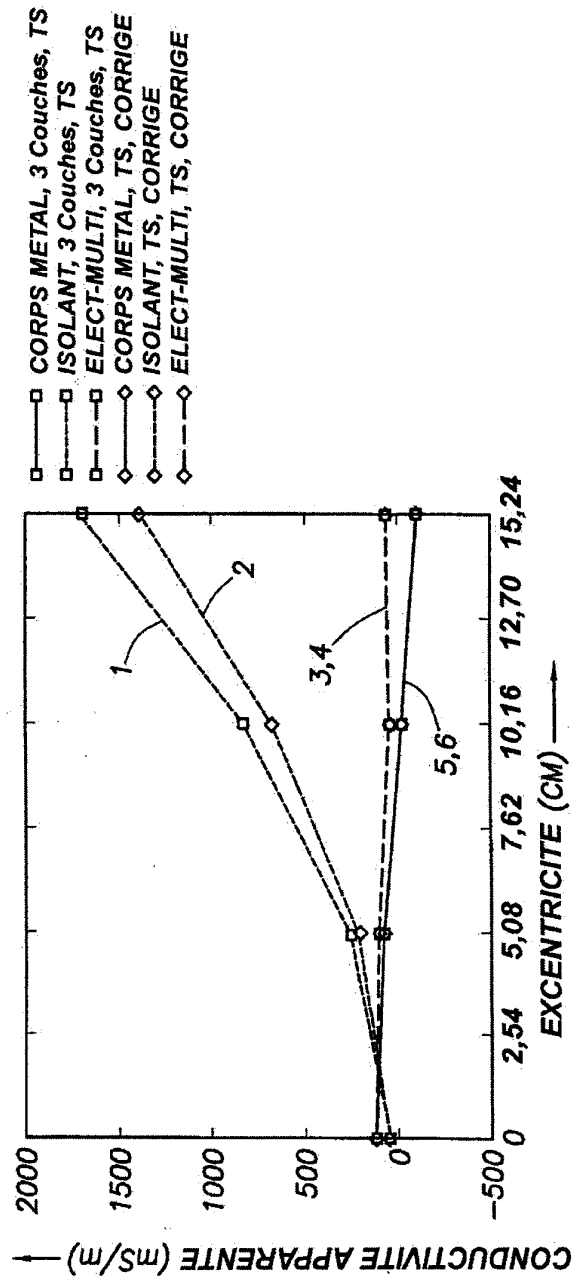
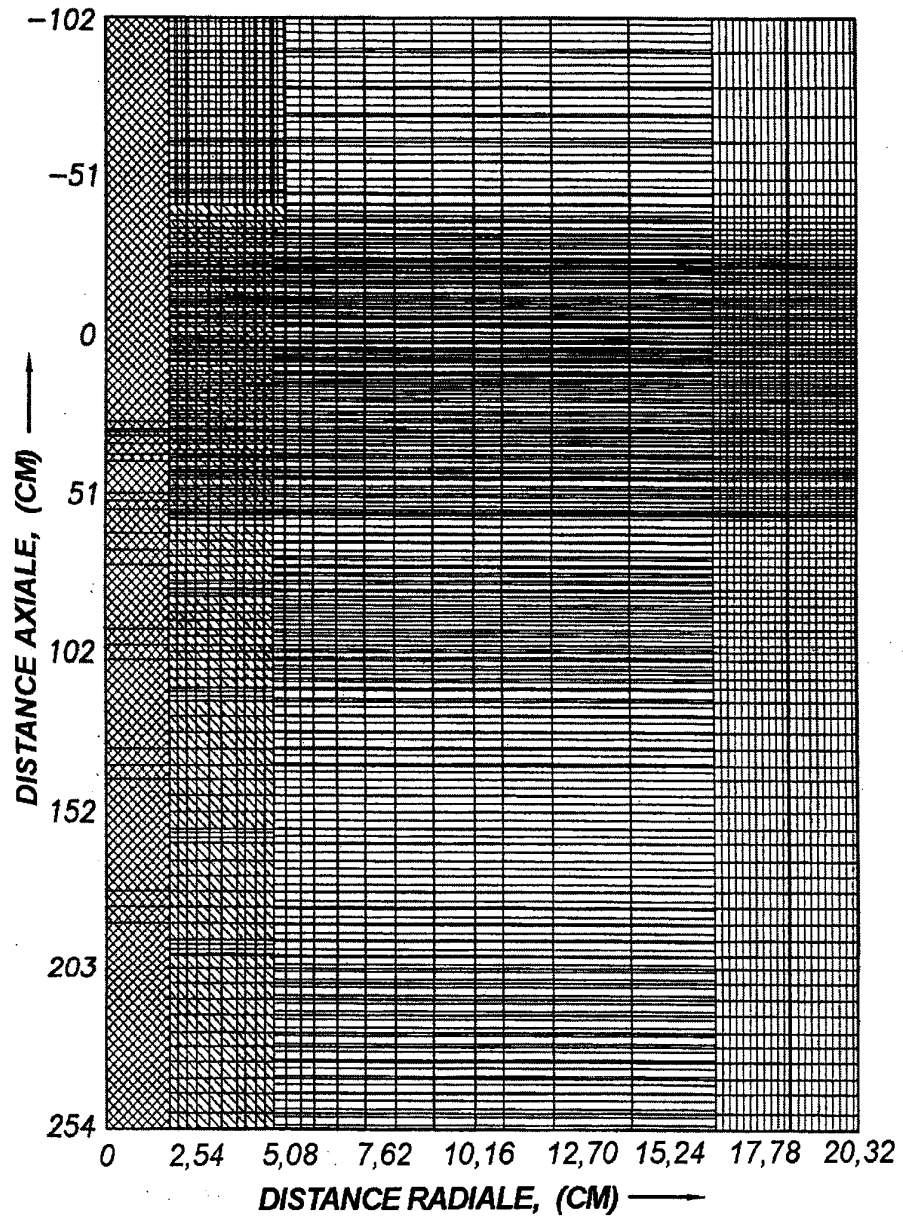


FIG. 15

13/20



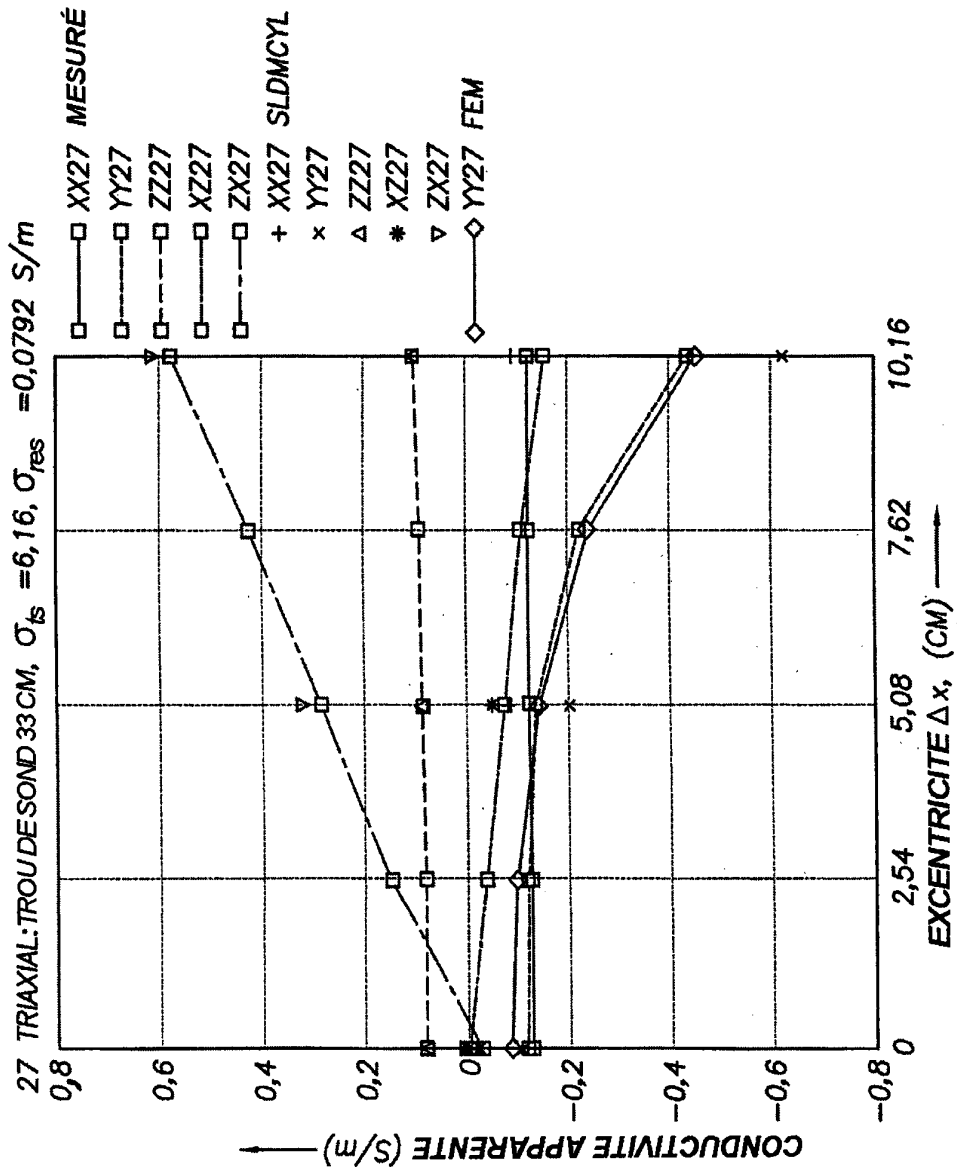
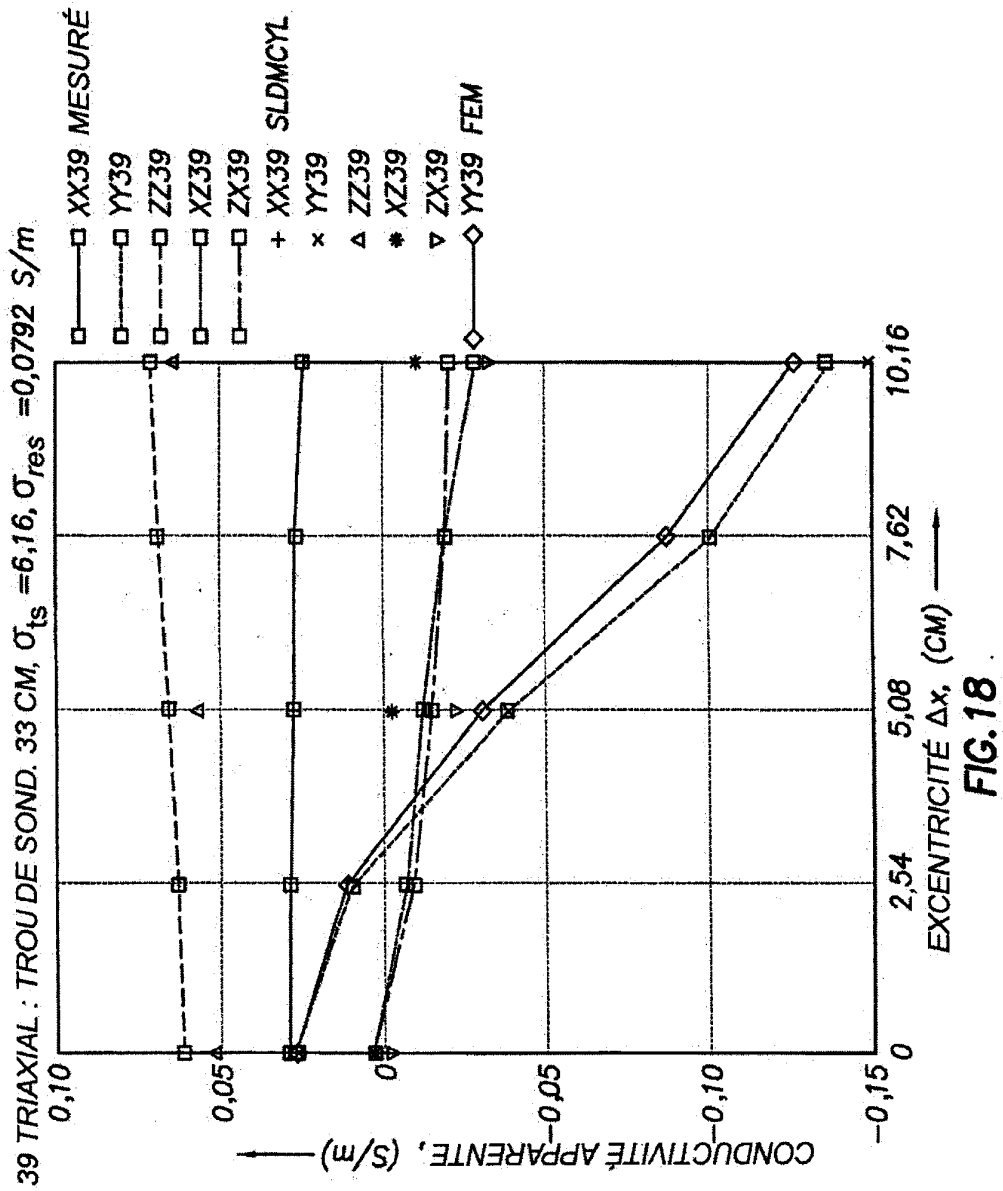


FIG. 17



16/20

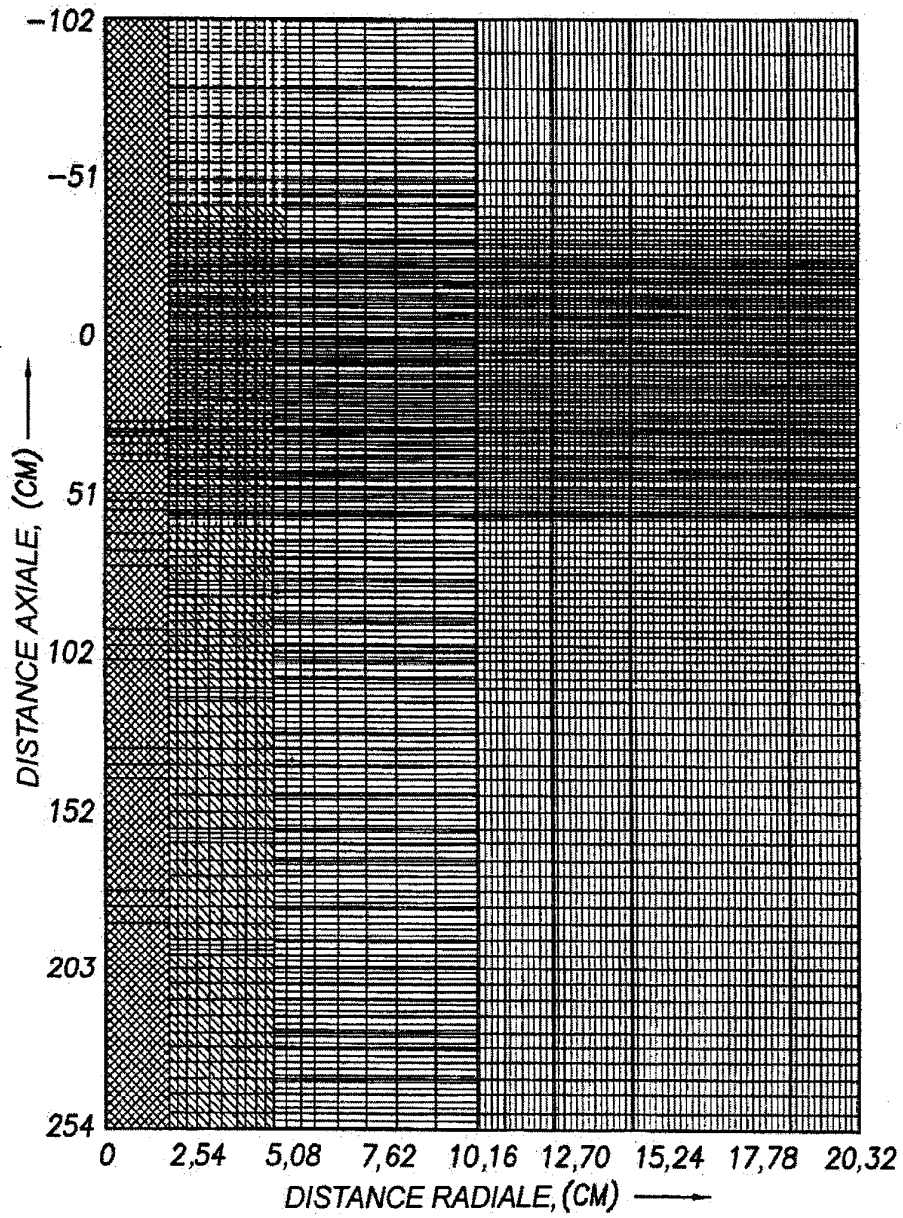


FIG. 19

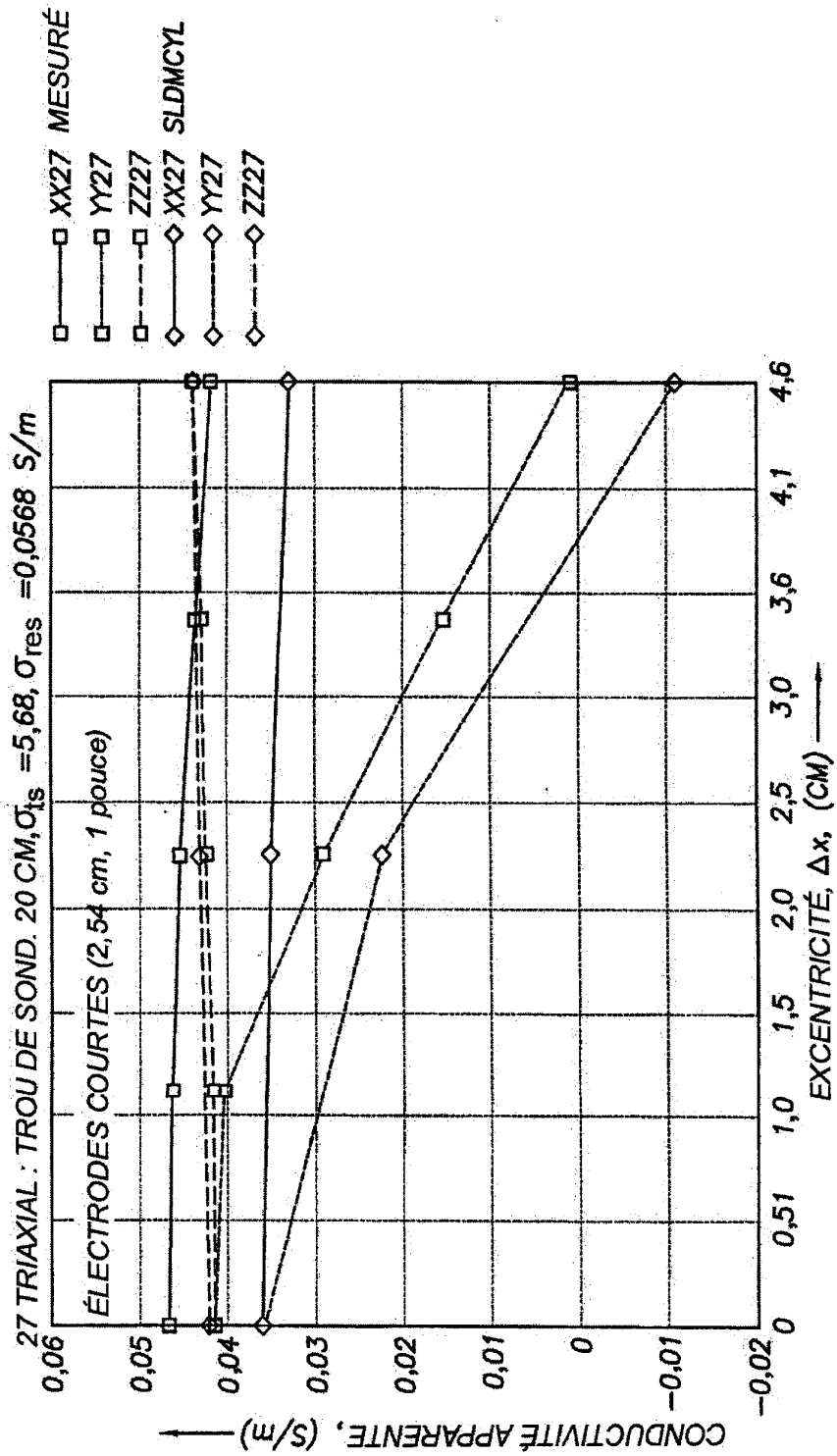


FIG.20

18/20

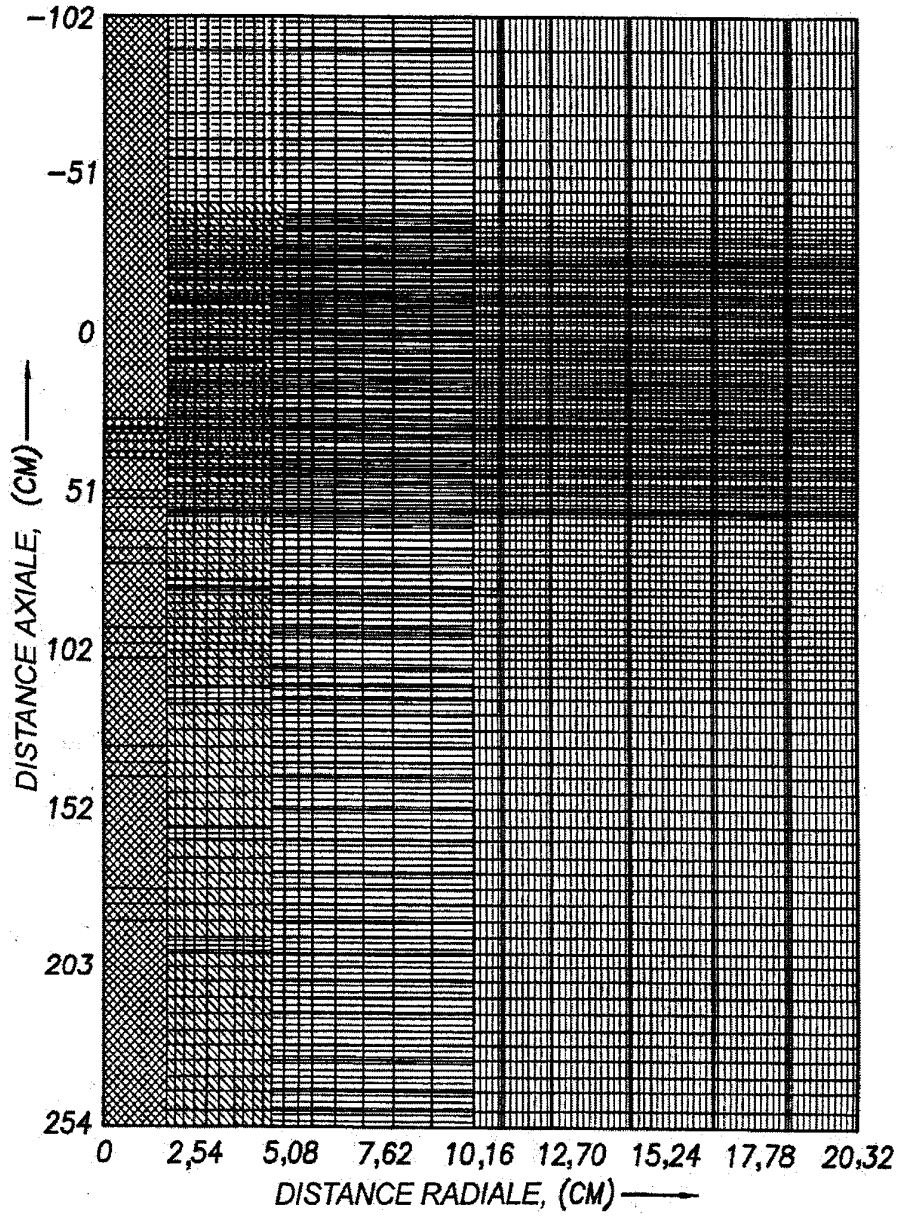


FIG.21

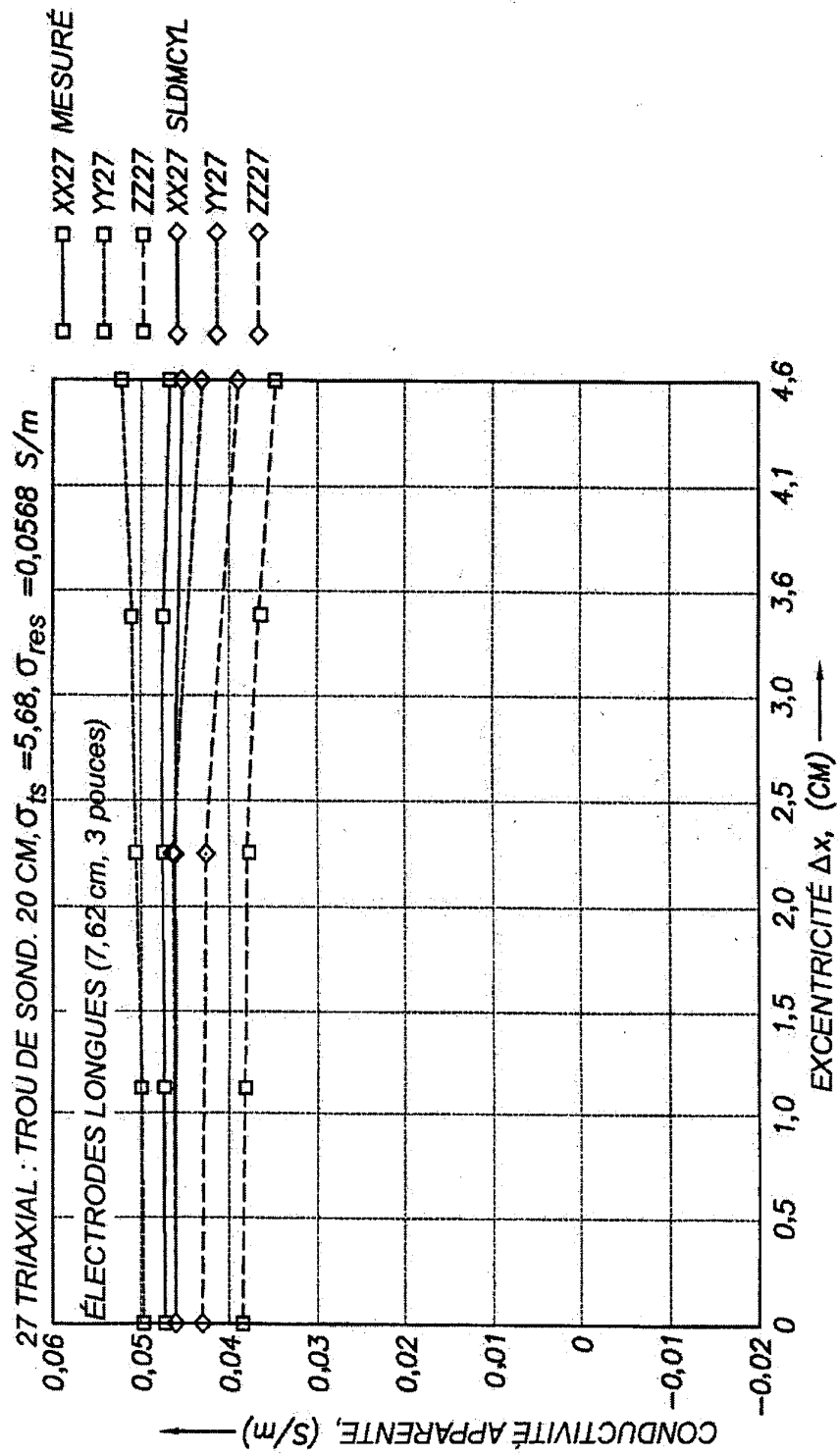


FIG.22

20/20

230

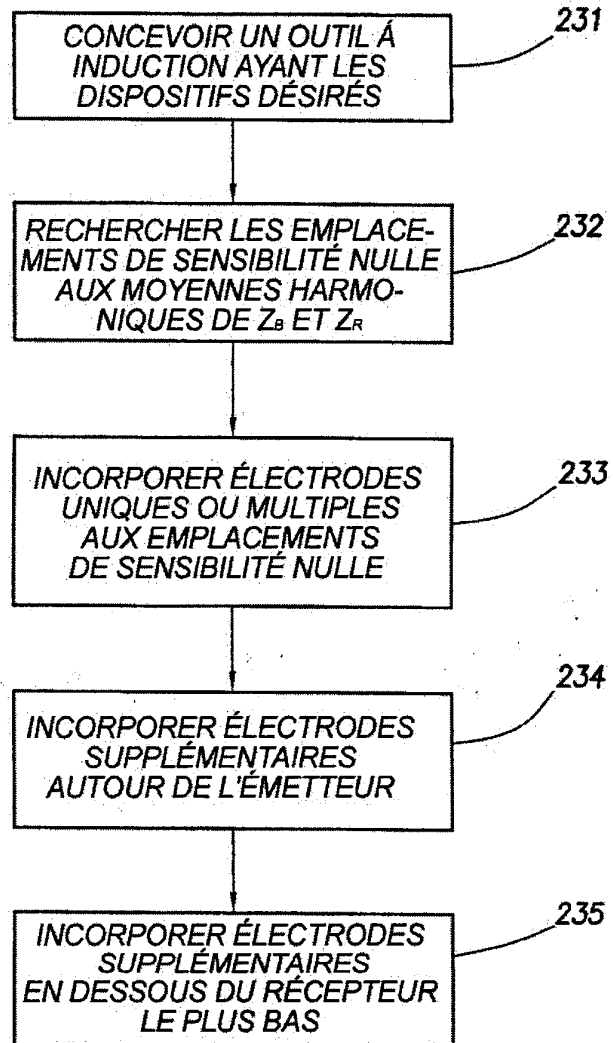


FIG.23