

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

11 N° de publication : **2 571 496**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

21 N° d'enregistrement national : **84 15301**

51 Int Cl^{*} : G 01 N 24/06; A 61 B 5/05; G 01 R 33/22,
33/022; H 01 F 5/00, 7/06.

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 5 octobre 1984.

30 Priorité :

43 Date de la mise à disposition du public de la
demande : BOPI « Brevets » n° 15 du 11 avril 1986.

60 Références à d'autres documents nationaux appa-
rentés :

71 Demandeur(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-
MIQUE, établissement de caractère scientifique, tech-
nique et industriel.* — FR.

72 Inventeur(s) : André Briguet, Christian Jeandey et Ed-
mond Tournier.

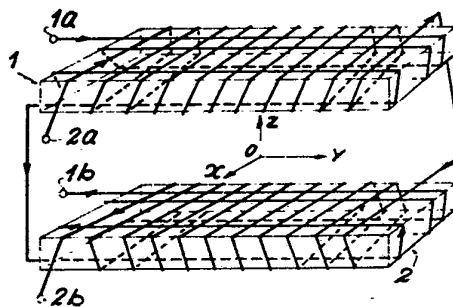
73 Titulaire(s) :

74 Mandataire(s) : Brevatome.

54 Système de bobines de production de champs additionnels pour l'obtention, dans un aimant comportant des pièces polaires de polarisation pour imagerie par résonance magnétique nucléaire, de champs de polarisation à gradients constants.

57 Système de bobines de production de champs additionnels dans un aimant comportant des pièces polaires 1, 2 pour imagerie par résonance magnétique nucléaire.

Il comprend : pour la création des gradients $G_x = \partial B_z / \partial x$ et $G_y = \partial B_z / \partial y$, deux nappes d'enroulements orthogonales 1a, 2a, 1b, 2b, une sur chaque pièce polaire; pour la création du gradient $G_z = \partial B_z / \partial z$, deux systèmes d'enroulements 8, 9, 10, 13, 14 de symétrie circulaire d'axe Oz, situés sur les faces internes en regard des pièces polaires et parcourus par des courants de sens opposés d'une pièce polaire à l'autre.



FR 2 571 496 - A1

D

SYSTEME DE BOBINES DE PRODUCTION DE CHAMPS ADDITIONNELS
POUR L'OBTENTION, DANS UN AIMANT COMPORTANT DES PIECES
POLAIRES DE POLARISATION POUR IMAGERIE PAR RESONANCE
MAGNETIQUE NUCLEAIRE, DE CHAMPS DE POLARISATION A
5 GRADIENTS CONSTANTS

La présente invention se rapporte aux techniques d'imagerie par la méthode dite de résonance magnétique nucléaire (RMN) actuellement en voie de développement rapide, notamment pour l'examen du corps humain, dont elle permet d'obtenir des images d'une qualité et d'une précision inconnues jusqu'ici avec les méthodes de la radiologie classique aux rayons X.

La méthode d'imagerie RMN utilise la propriété de résonance magnétique nucléaire de certains noyaux présents dans le corps humain, essentiellement les protons répartis dans tout l'organisme, et quelques noyaux d'intérêt biologique mais en abondance beaucoup moins grande tels que le phosphore (^{31}P), le potassium (^{39}K), le sodium (^{23}Na).

Une installation de RMN médicale se compose principalement d'un aimant destiné à produire dans toute la zone du corps à examiner un champ magnétique de polarisation \vec{B}_0 , statique et uniforme, auquel on superpose, à l'aide d'une bobine auxiliaire, un champ tournant de radio-fréquence dans un plan perpendiculaire à la direction du champ \vec{B}_0 précédent.

Les images sont obtenues en faisant résonner les noyaux d'hydrogène ou protons, contenus dans les tissus biologiques. Cette résonance est possible parce que chaque proton se comporte comme un microscopique aimant. En effet, lorsque l'on applique le champ statique \vec{B}_0 , les spins s'orientent tous parallèlement à l'axe du champ. Ils n'ont donc plus que deux orientations possibles : dans le sens du champ ou en sens contraire. Lorsqu'on applique en plus le champ tournant à

une fréquence quelconque, il ne se passe rien. Mais si cette fréquence est choisie égale ou très voisine de f_0 , telle que $2\pi f_0 = \gamma B_0$, formule dans laquelle γ est une constante physique caractéristique des noyaux que l'on veut mettre en résonance et dénommée rapport gyromagnétique, le couplage des spins et du champ tournant atteint une valeur telle que ceux-ci entrent en résonance.

Le signal de résonance détecté est proportionnel à l'aimantation des noyaux placés dans le champ magnétique \vec{B}_0 de polarisation. L'observation du phénomène de résonance requiert donc la présence d'un champ magnétique élevé (de 0,1 à 1 tesla) et de très grande uniformité dans tout le volume à imager.

L'image de résonance magnétique proprement dite, qui constitue la finalité médicale de l'exploration du patient, est ensuite construite progressivement par codage spatial à l'aide d'un ordinateur. Pour ce faire, plusieurs méthodes connues existent, notamment de constructions de l'image par points, par lignes et par plans, sur le détail desquelles il n'est pas nécessaire de revenir ici ; il suffira de savoir, pour la compréhension du présent texte, qu'elles impliquent toutes la superposition au champ de polarisation \vec{B}_0 et successivement dans le temps d'un grand nombre de champs complémentaires de durées et d'amplitudes très faibles, variables dans les trois directions (x, y et z) de l'espace, pour créer avec \vec{B}_0 un champ résultant \vec{B} dont la composante \vec{B}_z a des gradients spatiaux $\frac{\partial B_z}{\partial x}$, $\frac{\partial B_z}{\partial y}$ et $\frac{\partial B_z}{\partial z}$ constants selon x, y et z, z étant la direction du champ \vec{B}_0 . L'antenne et l'électronique associées pour la réception des différents signaux de résonance des protons ont une bande passante suffisamment large pour recevoir les fréquences de résonance f, voisine de f_0 , correspondant en chaque point examiné à la valeur

$2\pi f = \gamma B$, B étant le module du champ résultant en ce point, par définition voisin de \vec{B}_0 .

5 A titre indicatif, le champ \vec{B}_0 a une valeur de 0,1 à 1 tesla et les gradients $\frac{\partial B_z}{\partial x}$, $\frac{\partial B_z}{\partial y}$ et $\frac{\partial B_z}{\partial z}$ ont un ordre de grandeur de 10^{-1} à 10^{-2} tesla/mètre sur une longueur moyenne de ± 20 cm environ. Egalement à titre
10 indicatif, il faut 6 minutes environ par cette méthode pour construire une coupe de 128×128 points, ce qui correspond à l'établissement de 128 gradients de codage différents. Les machines modernes permettent d'obtenir plusieurs coupes (4 à 6) simultanément.

L'aimant utilisé pour créer le champ magnétique \vec{B}_0 de polarisation peut être, selon les cas, soit
15 un électroaimant, avec ou sans circuit magnétique, soit un aimant permanent, chacune de ces solutions présentant certains avantages et inconvénients spécifiques.

Lorsqu'il s'agit d'un électroaimant, ce dernier se compose le plus souvent de simples bobines hélicoïdales dans l'air, à l'exclusion de tout circuit
20 magnétique, dont le diamètre d'enroulement est prévu avec une dimension suffisante pour entourer le crâne du patient ou son corps et tous les accessoires nécessaires (antenne, bobines de gradient, ...). Ces bobines produisent alors un champ \vec{B}_0 de polarisation qui traverse
25 le patient des pieds à la tête selon l'axe de son corps.

Lorsqu'il s'agit d'un aimant permanent, la présence d'un circuit magnétique oblige à loger le patient dans un tunnel défini par la carcasse de l'aimant
30 et l'induction de polarisation \vec{B}_0 traverse alors généralement le corps du patient de la poitrine vers le dos selon une direction sagittale.

La présente invention se rapporte précisément
35 au domaine des dispositifs de production des gradients de champ magnétique linéaires dans des aimants, perma-

nents ou électroaimants, possédant des pièces polaires de forte perméabilité et s'applique particulièrement bien, encore que de façon non limitative, aux aimants permanents du type de ceux qui font l'objet de la demande de brevet française non publiée n° EN 84 05903 du 13 avril 1984 et dont on rappellera plus loin la structure. L'invention s'applique donc au cas où le patient couché dans l'entrefer entre une pièce polaire supérieure et une pièce polaire inférieure est traversé par le champ de polarisation selon une direction sagittale identifiée à l'axe Oz.

Les dispositifs de production de champs magnétiques à gradients constants constituent une partie très importante d'un imageur et conditionnent sa structure puisque :

- 1) - de la qualité des gradients dépend la qualité de l'image, toute variation du gradient entraînant une distorsion de celle-ci,
- 2) - les dispositifs, généralement des bobines, doivent être placés aussi près que possible de l'objet à imager selon des conditions de linéarité impérieuses (à 1% près dans tout le volume à imager) afin de limiter l'entrefer de l'aimant et par suite le poids donc le coût de la machine, et ce, dans des configurations spatiales telles qu'elles permettent le passage du patient dans ledit entrefer,
- 3) - le mode de production des champs à gradients constants doit s'intégrer le mieux possible à la structure du circuit magnétique (en l'occurrence aux pièces polaires) pour limiter la puissance des alimentations de courant pulsées, qui peut atteindre quelques dizaines de kW dans les imageurs actuels (résistifs et cryoaimants),
- 4) - les champs à gradients constants doivent être établis à chaque mesure dans des temps relativement courts, inférieurs à quelques ms.

Pour les systèmes à imagerie RMN à aimants "résistifs" ou supraconducteurs constitués de bobinages, dont les lignes de champ se referment dans l'air, on a recours, pour créer les champs complémentaires produisant des gradients spatiaux constants, à des bobines de correction, calculées pour corriger d'une façon générale les inhomogénéités du champ de polarisation jusqu'au quatrième ordre, ordre par ordre, avec un jeu de bobines pour chaque ordre, et l'on assimile les gradients à des corrections du premier ordre.

Tous ces systèmes s'appuient sur le fait que tout champ magnétique physiquement réalisable peut se développer selon une base de fonctions orthogonales, le plus souvent des harmoniques sphériques de Legendre. Cette procédure permet de profiler le champ à différents ordres, le gradient étant une approximation du champ au premier ordre. L'avantage de cette méthode est que, en théorie, les différents paramètres de réglages associés à un certain ordre (par exemple courant électrique dans un jeu de bobines) n'interagissent pas entre eux, et que le contrôle du champ peut être conduit d'une manière progressive, bien que fastidieuse, jusqu'à des ordres très élevés.

Ces dispositifs sont décrits, en particulier, dans l'article "Magnet field profiling : Analysis and correcting coil design" publié dans "Magnetic Resonance in Medicine" 1,44-65 (1984). Ils sont constitués de bobines montées sur des cylindres entourant le patient et, si l'on voulait appliquer cette technique à des aimants permanents, il faudrait placer les bobines dans l'entrefer, relativement loin des pièces polaires, ce qui conduirait à une diminution inacceptable de la place réservée, dans cet entrefer, au corps du patient.

Pour les systèmes à imagerie RMN à aimants permanents, on ne connaît pas, à l'heure actuelle, les moyens mis en oeuvre par les constructeurs pour produi-

re les gradients de champ linéaires, car ceux-ci ont conservé la confidentialité sur les structures utilisées.

On décrira maintenant une structure connue d'aimant permanent à laquelle s'applique spécialement bien la présente invention et qui a fait l'objet de la demande de brevet français non publiée n° EN 84 05903 du 13 avril 1984 au nom du demandeur.

Cette structure connue est représentée sur la figure 1 ci-jointe.

Sur cette figure 1, on a représenté, vu de face en perspective, un système à aimant permanent comportant ses deux pièces polaires supérieure 1 et inférieure 2 de forme générale parallélépipédique rectangle en un matériau ferromagnétique de très forte perméabilité. La structure est complétée latéralement par deux blocs magnétisants 3 et 4 également de forme parallélépipédique rectangle en des matériaux aimantés qui sont le siège de la force magnétomotrice destinée à produire le champ dans l'entrefer 5 en forme de tunnel, délimité précisément par les pièces polaires 1 et 2 et les blocs aimantés 3 et 4. Ces derniers blocs 3 et 4 sont constitués le plus souvent par la juxtaposition de colonnes constituées chacune d'un empilement de briques magnétiques élémentaires telles que 3a, 3b, 3c, ... etc 4a, 4b, 4c... etc qui servent ainsi également d'entretoises et de soutien aux pièces polaires 1 et 2. Ces colonnes ne sont pas nécessairement jointives. L'entrefer en forme de tunnel 5 destiné au logement éventuel de tout ou partie d'un corps humain 6, possède, à cet effet, une largeur et une hauteur minimales de l'ordre de 500 mm.

Sur la figure 1, on a représenté par des flèches la répartition du flux magnétique et des lignes de champ dans les blocs aimantés 3 et 4 ainsi que dans les pièces polaires 1 et 2. Comme indiqué sur cette figure

1, l'induction magnétique de polarisation B_0 dans le tunnel 5 est dirigée verticalement de bas en haut, c'est-à-dire de la pièce polaire 1 vers la pièce polaire 2, traversant ainsi le corps 6 du patient selon une direction sagittale identifiée, dans toute la suite du présent texte, avec l'axe Oz de repère du trièdre de référence Ox, y, z de la figure 1.

Dans cette configuration, les gradients de la composante B_z selon Oz des différents champs résultants nécessaires à la construction de l'image par codage spatial, à savoir $\frac{\partial B_z}{\partial x}$, $\frac{\partial B_z}{\partial y}$ et $\frac{\partial B_z}{\partial z}$ doivent être constants et satisfaire les trois égalités suivantes :

$$B_z(x) = \frac{\partial B_z}{\partial x} \cdot x = G_x \cdot x$$

$$B_z(y) = \frac{\partial B_z}{\partial y} \cdot y = G_y \cdot y$$

$$B_z(z) = \frac{\partial B_z}{\partial z} \cdot z = G_z \cdot z$$

dans lesquelles B_z est la composante de l'induction résultante selon l'axe Oz précédemment défini et G_x , G_y , G_z sont les trois gradients constants de l'induction résultante selon les trois directions Ox , Oy et Oz .

La présente invention a précisément pour objet un système de bobines, adaptables notamment à la structure précédente ainsi qu'à tout type d'aimants présentant des pièces polaires flottantes de forte perméabilité, et produisant des champs à gradients constants à $\pm 1\%$ dans les volumes à imager.

Ce système de bobines de production de champs additionnels dans un aimant comportant des pièces polaires pour imagerie par résonance magnétique nucléaire dans une configuration où le champ de polarisation \vec{B}_0 , perpendiculaire aux pièces polaires, est parallèle à la direction Oz d'un trièdre trirectangle de référence, et

les pièces polaires, rectangulaires, ont leurs côtés parallèles aux directions Ox et Oy de ce même trièdre, pour l'obtention de champs de polarisation résultants \vec{B} dont la composante \vec{B}_z selon la direction Oz a des gradients constants G_x , G_y , G_z selon les trois directions de l'espace, se caractérise en ce qu'il comprend :

- pour la création des gradients $G_x = \frac{\partial B_z}{\partial x}$ et $G_y = \frac{\partial B_z}{\partial y}$ deux nappes d'enroulements orthogonales en série, une sur chaque pièce polaire, chacune étant constituée de conducteurs parallèles à l'un des axes Ox ou Oy et uniformément répartis, et étant alimentée de telle sorte que les courants circulent dans la même direction sur les faces internes de l'entrefer,
- pour la création du gradient $G_z = \frac{\partial B_z}{\partial z}$, deux systèmes d'enroulements de symétrie circulaire d'axe Oz , situés sur les faces internes en regard des pièces polaires et parcourus par des courants de sens opposés d'une pièce polaire à l'autre.

Selon l'invention, les enroulements de création des gradients G_x et G_y peuvent se présenter sous deux formes différentes.

Dans une première forme, les "retours" de courant sont situés sur la face opposée des conducteurs "aller" et chaque pièce polaire est ainsi en quelque sorte "emmaillotée" par les conducteurs qui parcourent ses deux faces.

Dans une deuxième forme de mise en oeuvre, seuls les conducteurs "aller" sont situés à la surface des pièces polaires, les conducteurs "retour" étant situés en une zone de l'espace éloignée des pièces polaires.

Dans une installation d'imagerie par RMN dans laquelle l'aimant est un aimant permanent muni de pièces polaires, on sait qu'il n'est pas possible d'utiliser les mêmes bobines pour produire le champ de polari-

sation \vec{B}_0 et les champs additionnels superposés à ce champ \vec{B}_0 pour effectuer la construction spatiale de l'image. L'invention propose donc un système de bobines particulièrement simple qui permettent de créer, avec une linéarité à 1% près, de tels champs additionnels conduisant à des gradients constants. Dans la structure de cet ensemble de bobines selon l'invention, toutes les bobines sont situées sur les pièces polaires sans aucune perte de place pour le patient qui doit être logé dans le tunnel constitué par le circuit magnétique de l'aimant.

Par ailleurs, les courants qui sont nécessaires pour créer les champs additionnels à gradients constants sont pratiquement égaux à la moitié des intensités de courant qui sont nécessaires pour créer ces mêmes champs additionnels dans les systèmes de l'art antérieur où les bobines créatrices du champ de polarisation sont le plus souvent dans l'air.

Selon l'invention, le système d'enroulements d'axe Oz est composé de deux bobines symétriques situées sur les pièces polaires et conçues chacune de façon telle que l'intensité de courant qui traverse un plan passant par l'axe Oz, entre le centre de la bobine et un point distant de r de cet axe, soit proportionnel à r^2 .

De façon plus précise encore, lorsque le système d'enroulements d'axe Oz est composé de deux bobines constituées de spires circulaires concentriques, la condition précédente se traduit par le fait que la répartition spatiale de ces spires en fonction du rayon croît de façon telle que la somme totale des spires intérieures à un cercle de rayon r soit proportionnelle à r^2 .

Selon un mode de mise en oeuvre particulièrement simple du présent système de bobines, les spires

de celles-ci sont réparties selon des groupements situés à des distances $r, 2r, 3r, \dots$ de l'axe Oz , le nombre de spires des groupements successifs étant égal aux termes de la suite des nombres impairs 1, 3, 5... $(2n+1)$. On sait en effet que la somme des nombres impairs de 1 à $2n+1$ est égale à $(n+1)^2$, ce qui est conforme à la caractéristique précédemment énoncée pour le groupement des spires de bobines.

Dans une variante de l'invention, le système d'enroulement d'axe Oz est réalisé à l'aide d'un circuit imprimé en forme de spirale dont l'espacement entre les bandes va en se rétrécissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de façon à respecter la loi de répartition du courant proportionnellement à r^2 selon la direction radiale.

Selon une autre variante de réalisation de ce même système de bobines, le système d'enroulements de symétrie circulaire d'axe Oz est constitué de bobines discrètes localisées sur les sections droites de cônes circulaires de sommet O , centre de l'entrefer, d'axe Oz et de demi-angles au sommet θ .

Dans un premier exemple de mise en oeuvre de cette variante, les bobines au nombre de 2 sur chaque pièce polaire comportent respectivement des nombres de spires dans le rapport de l'ordre de 1 à 8,66 et sont situées sur des cônes de demi-angles au sommet voisins de $\theta_1 = 34^\circ$ et $\theta_2 = 62^\circ$.

Dans une autre réalisation de cette même variante, les bobines, au nombre de trois sur chaque pièce polaire, comportent respectivement des nombres de spires dans les rapports de l'ordre de 1 à 3,89 et 31,85 et sont situées sur des cônes de demi-angles au sommet voisins de $\theta_1 = 26^\circ$, $\theta_2 = 47^\circ$ et $\theta_3 = 69^\circ$.

De toute façon, l'invention sera mieux comprise en se référant à la description qui suit de plu-

sieurs exemples de mise en oeuvre, donnés à titre surtout illustratif et non limitatif, en se référant aux figures 2 à 9 ci-jointes sur lesquelles :

5 - les figures 2 et 3 représentent en perspective cavalière et en coupe selon un axe Oy un exemple de réalisation des gradients G_x et G_y ,

- la figure 4 montre une réalisation possible d'une bobine d'axe Oz pour la création du gradient G_z ,

10 - la figure 5 montre une variante de la bobine précédente dans une réalisation sous forme d'un circuit imprimé,

- la figure 6 montre une autre variante d'une bobine de création du gradient G_z constituée d'un empilement de spires plates,

15 - la figure 7 est une vue en coupe selon le plan yOz des pièces polaires de l'aimant permanent permettant d'expliquer le fonctionnement des bobines précédentes,

20 - les figures 8 montrent l'exemple d'une réalisation de bobines pour créer le gradient G_z à l'aide de deux bobines discrètes situées sous les pièces polaires,

25 - la figure 9 montre un exemple de réalisation comportant trois bobines discrètes pour créer ce même gradient G_z .

Sur la figure 2, on a représenté schématiquement en perspective cavalière les deux pièces polaires 1 et 2 de l'aimant de la figure 1 sur lequel sont situés les enroulements 1a et 1b de création du gradient G_x et 2a et 2b de création du gradient G_y . Comme on le voit sur cette figure, les bobines 1a et 1b d'une part et 2a et 2b d'autre part sont montées en série et entourent les pièces polaires 1 et 2 de deux nappes de courant constituées de conducteurs parallèles aux directions Ox et Oy et uniformément répartis à la surface des pièces

30
35

polaires 1 et 2. L'enroulement 2a, 2b qui sert à la création du gradient G_y est orthogonal au premier et est constitué de la même façon par des nappes de conducteurs parallèles uniformément répartis selon l'axe Ox . Conformément à l'invention, et comme on le voit sur la figure 3 pour la bobine 1a et la bobine 1b, les sens de courant sont inversés de l'une à l'autre bobine, c'est-à-dire symétriques par rapport à la direction Ox pour les bobines 1a et 1b et Oy pour les bobines 2a et 2b. Comme on le voit également sur les figures 2 et 3, le retour de courant de chaque conducteur est assuré par une nappe parallèle située de l'autre côté de chaque pièce polaire qui joue ainsi le rôle de noyau magnétique plongé dans un solénoïde à base rectangulaire. Lorsque le courant continu est établi dans les nappes de courant précédent, celui-ci conduit à créer des potentiels magnétiques croissants de façon linéaire suivant les directions x ou y dans les pièces polaires. On obtient ainsi des champs de gradients constants selon ces directions et, si on applique simultanément le courant dans les deux enroulements 1a, 1b d'une part et 2a, 2b d'autre part, on obtient par superposition d'état un gradient de champ dirigé dans le plan xOy .

De manière pratique, les bobinages sont réalisés soit avec du fil isolant encerclant les pièces polaires 1 et 2, soit par gravure sur circuit imprimé dont les deux plans sont ainsi réunis par des bandes ou fils de liaison rigides. Conformément à l'invention, les nappes 1a et 1b d'une part sont parcourues en série par la même intensité ainsi que les nappes 2a et 2b d'autre part.

La longueur des pièces polaires 1 et 2 étant grande par rapport à l'épaisseur de l'entrefer nécessaire pour l'homogénéité du champ \vec{B}_0 , on obtient ainsi facilement des gradients constants à plus ou moins 1%

près sur environ la moitié de chacune des plaques polaires 1 et 2. Si l'on souhaite augmenter encore l'homogénéité du champ continu \vec{B}_0 , on peut améliorer la zone d'homogénéité du gradient précédent en modifiant légèrement l'espacement des conducteurs des nappes 1a, 2a et 1b, 2b précédentes près des extrémités des plaques ou ce qui revient au même en superposant à des nappes régulières quelques ampères tours supplémentaires. Cette correction est de même nature que celle du champ continu \vec{B}_0 que l'on obtient dans les aimants permanents à l'aide des systèmes d'anneaux de garde.

On expliquera maintenant en se référant à la figure 3 le principe du fonctionnement du système de bobines de la figure 2 qui est le suivant. Pour ce faire, on calculera la circulation du vecteur champ H le long de la boucle fermée 7 parcourant à la fois l'entrefer de dimension E et les pièces polaires 1 et 2 supposées en un matériau de perméabilité suffisamment forte ($\mu \gg 100$) pour que l'on puisse supposer nulle la force magnétomotrice nécessaire pour la circulation du champ dans ces pièces polaires proprement dites. Dans ces conditions, si l'on appelle +X et -X les abscisses extrêmes de la boucle 7, le théorème d'Ampère s'écrit alors le long de cette boucle 7 :

$$2B_z(X) \cdot E = 4\mu_0 \int_0^X i_x dx \quad (1)$$

formule dans laquelle E est la largeur de l'entrefer, i_x est la densité linéique de courant à la cote x et s'exprime en $A.m^{-1}$, μ_0 vaut dans le système SI $4\pi \cdot 10^{-7} A.s.V^{-1}.m^{-1}$.

La condition à réaliser pour le gradient G_x étant par définition $B_z(X) = G_x \cdot X$, il en résulte :

$$i = \frac{G_x \cdot E}{2\mu_0} = \text{constante} \quad (2)$$

L'équation 2 montre que la proportionnalité de la composante $B_z(X)$ à l'abscisse X est obtenue automatiquement par une densité de courant i constante dont la valeur est donnée par l'équation 2.

5 Ce calcul permet de vérifier que la structure des figures 2 et 3 permet bien, à l'aide de la nappe 1a, 1b de bobines entourant les pièces polaires 1 et 2, de créer dans l'entrefer un champ additionnel dont le gradient G_x est constant dès lors que les bobines de pas
10 constant sont parcourues en série par un courant I .

Sur la figure 4, on a décrit un des modes de réalisation possible des bobines de structure circulaire concentrique centrées sur l'axe Oz destinées à produire le gradient G_z . Conformément à l'invention, cette
15 bobine comporte des spires réparties de la façon suivante. A la distance r du centre O est située une spire référencée 8, à la distance $2r$ du centre O se trouvent trois spires référencées 9 et à la distance $3r$ du centre O se trouvent cinq spires référencées 10. Toutes
20 ces spires sont évidemment en série entre une entrée 11 et une sortie 12 et deux ensembles tels que celui de la figure 4 se font face sur les deux pièces polaires 1 et 2, chacun de ces ensembles étant parcouru par la même intensité i circulant en sens inverse du sens de circulation dans l'autre bobine. Le nombre de groupes de
25 spires n'est pas limitatif. Dans la pratique on prendra un pas entre chaque groupe de l'ordre du centimètre.

Sur la figure 5, on a représenté une bobine de création du gradient G_z qui comporte autour de l'axe
30 Oz , sur la face plane de la pièce polaire tournée vers l'entrefer, un circuit imprimé 13 en forme de spirale dont l'espacement entre les différentes bandes va en se rétrécissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre O , de façon à ce que l'intensité de courant qui
35 circule perpendiculairement à l'un des plans xOz ou yOz

entre le centre 0 et un point distant de r , soit proportionnelle au carré de la distance r au centre 0.

Sur la figure 6, une variante de réalisation de la bobine créatrice du gradient G_z est représentée, dans laquelle cette bobine comporte un certain nombre de spires plates telles que 14 assemblées selon des zones concentriques dont chacune a la largeur d'une spire. On réalise ainsi un empilement de profil conique dans le plan de la figure qui est le plan yOz de la figure 1. Bien entendu, les différentes spires ainsi empilées sont isolées les unes des autres, montées en série et parcourues par des courants dont les sens marqués sur la figure 6 sont opposés quand on passe de la bobine recouvrant la pièce polaire 1 à la bobine recouvrant la pièce polaire 2. La répartition des différentes spires plates élémentaires répond à la condition selon laquelle le nombre de spires dans un plan zOy depuis le centre jusqu'à la distance r de l'axe Oz est proportionnel à r^2 .

Le principe de fonctionnement des bobines des figures 4, 5 et 6 sera décrit maintenant en se référant à la figure 7 dans laquelle on voit les pièces polaires 1 et 2 en coupe selon le plan yOz . Sur cette figure, deux bobines de création du gradient G_z conforme à l'invention ont été schématisées par les conducteurs supérieurs 15 et 16 et inférieurs 17 et 18.

Si l'on considère maintenant un volume cylindrique de rayon R centré sur l'axe Oz d'épaisseur Dz à la hauteur Z , le flux entrant par la face supérieure de ce volume est $B_z \cdot S = G_z \cdot (Z + dz) \cdot \pi R^2$, le flux sortant par la face inférieure de ce même volume est $G_z \cdot (Z) \cdot \pi R^2$. La différence entre ces deux flux doit être égale au flux s'échappant par les parois latérales, soit :

$$G_z \cdot dz \cdot \pi R^2 = B_r \cdot 2\pi R \cdot dz \quad \text{ou encore :} \\ 35 \quad B_r (R) = \frac{G_z \cdot R}{2} \quad (3)$$

formule dans laquelle $B_r(R)$ est l'induction radiale à la distance R du centre.

En revenant maintenant à la figure 7, on examinera deux chemins fermés 19 et 20 sortant des pièces polaires suivant l'axe Z (A et A') puis un trajet commun dans le plan médian (B et B') puis deux trajets parallèles à l'axe Z entrant dans les pièces polaires (C et C') pour se refermer selon deux trajets (D et D').

La circulation du champ est nulle pour les trajets D et D' dans les pièces polaires (perméabilité $\mu_{rel} > 100$), elle est opposée pour les portions A et C ainsi que A' et C' (composante B_z). Il ne reste que la circulation de B_r le long de B et B' qui permet d'écrire :

$$\int_0^R \frac{1}{2} B_r \cdot dr = \mu_0 \int_0^R i_r \cdot dr$$

formule dans laquelle i_r est la densité de courant linéique dans les bobines 15-16 et 17-18, soit $i_r = \frac{1}{2\mu_0} B_r$.

D'où finalement par rapprochement avec l'égalité (3) précédente :

$$i_r(R) = \frac{Gz \cdot R}{4\mu_0} \quad (4)$$

Cette dernière formule (4) signifie que, pour créer des gradients Gz , il suffit de tapisser les faces en regard des pièces polaires de nappes de courant circulaires centrées sur cet axe z et dont la densité linéique i_r croît linéairement comme r . Cette condition conduit en effet pratiquement à réaliser des bobines concentriques dont le nombre de spires croît de manière telle que la somme totale des spires intérieures dans un cercle de rayon r soit proportionnelle au carré de

la distance r au centre.

On décrira maintenant en se référant aux figures 8 et 9 deux types de bobines particulières, toujours d'axe Oz , pour créer des gradients Gz , mais sous
5 forme de bobines discrètes dont la position et le nombre de tours sont déterminés par des abaques et calculs issus de la théorie des polynômes de Legendre.

Sur la figure 8, où l'on a représenté encore
10 une fois schématiquement les pièces polaires 1 et 2, on a logé contre ces pièces polaires 1 et 2 quatre bobines 21, 22, 23 et 24 qui sont situées respectivement à l'intersection des faces polaires et de cônes circulaires d'axe Oz dont le sommet est situé en O et de demi-angles au sommet d'ouverture $\theta_1 = 34^\circ$ et $\theta_2 = 62^\circ$. Le
15 rapport du nombre de spires entre les bobines 21 et 22 ou 23 et 24 est le plus voisin possible de 1 à 8,66 et les sens des courants, figurés schématiquement sur la figure 8 par les signes conventionnels classiques, sont, comme toujours dans la présente invention, inver-
20 sés d'une pièce polaire à l'autre.

Sur la figure 9, on a représenté une structure de même nature que celle de la figure 8 mais comportant sur chaque pièce polaire trois bobines au lieu des deux
25 précédentes ; elles sont référencées respectivement 24, 25 et 26 pour la pièce polaire 1 et 27, 28 et 29 pour la pièce polaire 2. Conformément à l'invention, ces bobines sont situées à l'intersection des pièces polaires 1 et 2 avec des cônes cylindriques de révolution d'axe Oz et de demi-angles aux sommets respectifs
30 26° pour le premier cône, 47° pour le second et 69° pour le troisième. Les rapports des nombres de spires dans chacune des bobines sont, du centre à la périphérie, de l'ordre de 1 à 3,89 et 31,85. Comme précédemment, les sens de courant figurés sur les bobines sont
35 inversés lorsque l'on passe de la pièce polaire 1 à la

pièce polaire 2.

Comme on le voit dans toutes les réalisations qui viennent d'être décrites précédemment, les systèmes de bobines objet de l'invention sont situés tout contre les faces des pièces polaires en regard de l'aimant de polarisation et ne conduisent pratiquement de ce fait à aucune perte de place pour l'espace réservé dans l'entrefer au logement du patient à examiner.

REVENDECATIONS

1. Système de bobines de production de champs additionnels dans un aimant comportant des pièces polaires (1, 2) pour imagerie par résonance magnétique nucléaire dans une configuration où le champ de polarisation \vec{B}_0 , perpendiculaire aux pièces polaires, est parallèle à la direction Oz d'un trièdre trirectangle de référence, et les pièces polaires, rectangulaires ou circulaires, ont leurs côtés parallèles aux directions Ox et Oy de ce même trièdre, pour l'obtention de champs de polarisation résultants \vec{B} dont la composante \vec{B}_z selon la direction Oz a des gradients constants G_x , G_y , G_z selon les trois directions de l'espace, caractérisé en ce qu'il comprend :
- 15 - pour la création des gradients $G_x = \frac{\partial B_z}{\partial x}$ et $G_y = \frac{\partial B_z}{\partial y}$ deux nappes d'enroulements orthogonales (1a, 2a, 1b, 2b), une sur chaque pièce polaire, chacune étant constituée de conducteurs parallèles à l'un des axes Ox ou Oy et uniformément répartis, et étant alimentée de telle sorte que les courants circulent dans la même direction sur les faces internes de l'entrefer,
 - 20 - pour la création du gradient $G_z = \frac{\partial B_z}{\partial z}$, deux systèmes d'enroulement 8, 9, 10, 13, 14 de symétrie circulaire d'axe Oz, situés sur les faces internes en regard des
 - 25 pièces polaires et parcourus par des courants de sens opposés d'une pièce polaire à l'autre.

2. Système de bobines selon la revendication 1, caractérisé en ce que les enroulements de création des gradients G_x et G_y ont leurs conducteurs "retour" situés sur la face opposée des conducteurs "aller", chaque pièce polaire étant ainsi en quelque sorte "emmaillotée" par les conducteurs qui parcourent ses deux faces.

3. Système de bobines selon la revendication 1, caractérisé en ce que les enroulements de créa-

tion des gradients G_x et G_y ont leurs conducteurs "aller" situés à la surface des pièces polaires, les conducteurs "retour" étant situés dans une zone de l'espace éloignée des pièces polaires.

5 4. Système de bobines selon la revendication 1, caractérisé en ce que le système d'enroulement d'axe Oz est composé de deux bobines symétriques situées sur les pièces polaires et conçues chacune de façon telle que l'intensité de courant qui traverse un
10 plan passant par l'axe Oz entre le centre de la bobine et un point distant de r de cet axe soit proportionnelle à r^2 .

 5. Système de bobines selon la revendication 4, caractérisé en ce qu'il est constitué de spires
15 circulaires concentriques 8, 9, 10 dont la répartition spatiale croît en fonction du rayon de façon telle que la somme totale des spires intérieures à un cercle de rayon r soit proportionnelle à r^2 .

 6. Système de bobines selon la revendication 5, caractérisé en ce que les spires (8, 9, 10)
20 sont réparties selon des groupements situés à des distances $r, 2r, 3r, \dots$ de l'axe Oz , le nombre de spires des groupements successifs étant égal aux termes de la suite des nombres impairs 1, 3, 7..., $(2n+1)$.

25 7. Système de bobines selon la revendication 4, caractérisé en ce que le système d'enroulement d'axe Oz est réalisé à l'aide d'un circuit imprimé (13) en forme de spirale dont l'espacement entre les bandes va en se rétrécissant au fur et à mesure que l'on
30 s'éloigne du centre de façon à respecter la loi de répartition du courant proportionnellement à r^2 selon la direction radiale.

 8. Système de bobines selon la revendication 5, caractérisé en ce que le système d'enroulement d'axe
35 Oz est réalisé par un empilement des pires plates con-

tiguës (14) et en série, selon un profil conique dans un plan passant par Oz et respectant la loi du nombre de spires proportionnel à r^2 dans un cercle de rayon r.

5 9. Système de bobines selon la revendication 1, caractérisé en ce que le système d'enroulement de symétrie circulaire d'axe z est constitué de bobines discrètes (21, 22, 24, 25, 26) localisées sur les sections droites de cônes circulaires de sommet 0, centre de l'entrefer, d'axe Oz et de demi-angles au sommet θ .

10 10. Système de bobines selon la revendication 9, caractérisé en ce que les bobines, au nombre de deux (21, 22, 23, 24) sur chaque pièce polaire, comportent respectivement des nombres de spires dans le rapport de l'ordre de 1 à 8,66 et sont situées sur des
15 cônes de demi-angles au sommet voisins de $\theta_1=34^\circ$ et $\theta_2=62^\circ$.

20 11. Système de bobines selon la revendication 9, caractérisé en ce que les bobines (24, 25, 26) au nombre de trois sur chaque pièce polaire, comportent respectivement des nombres de spires dans les rapports de l'ordre de 1 à 3,89 et 31,85 et sont situées sur des cônes de demi-angles au sommet voisins de $\theta_1=26^\circ$, $\theta_2=47^\circ$ et $\theta_3=69^\circ$.

1.4

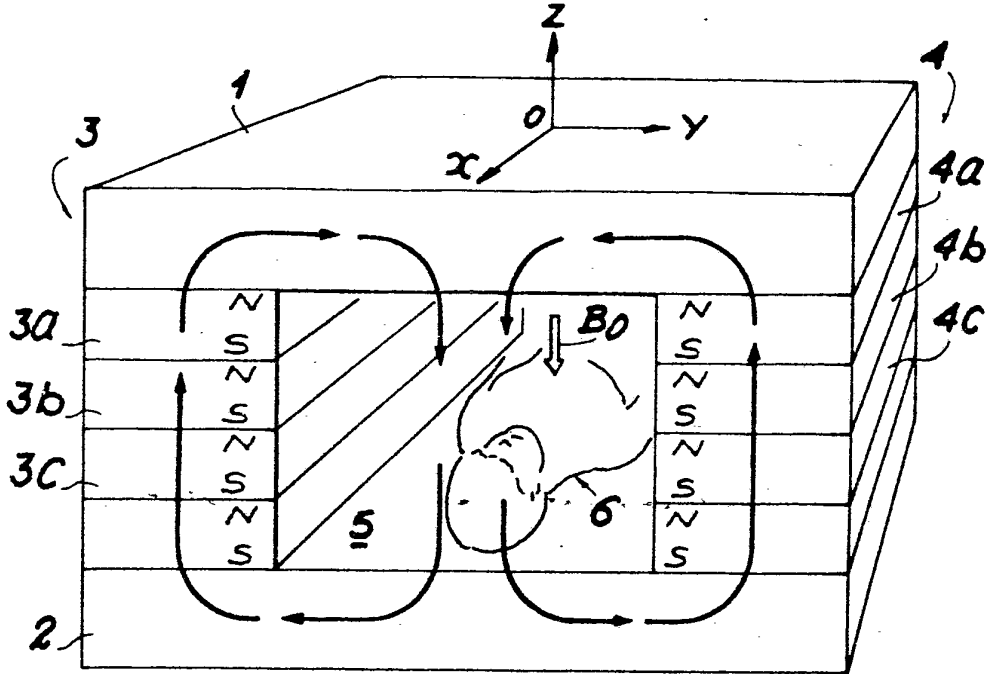


FIG. 1

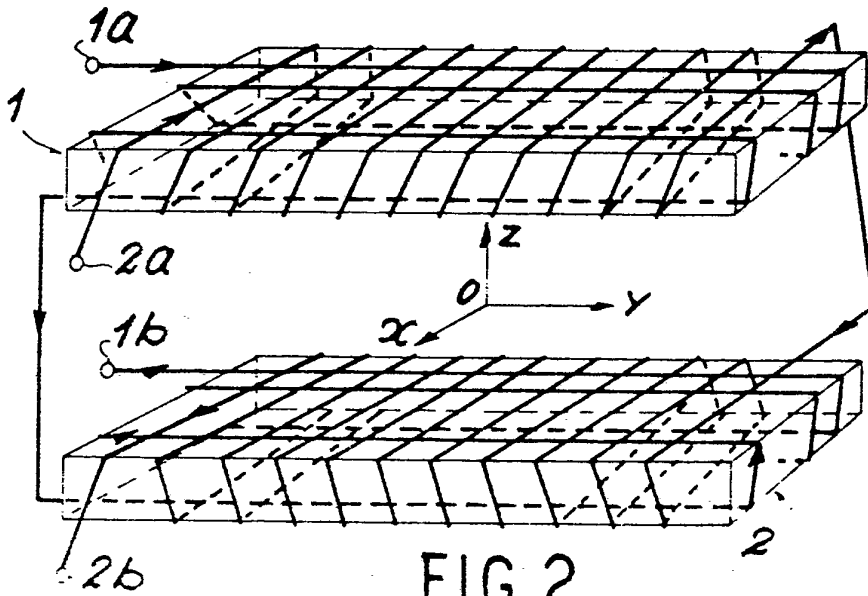


FIG. 2

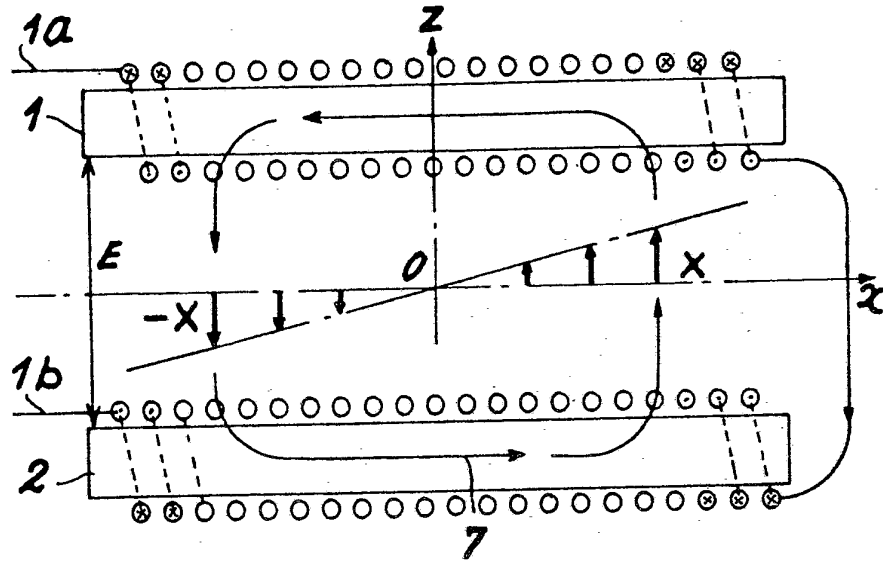


FIG. 3

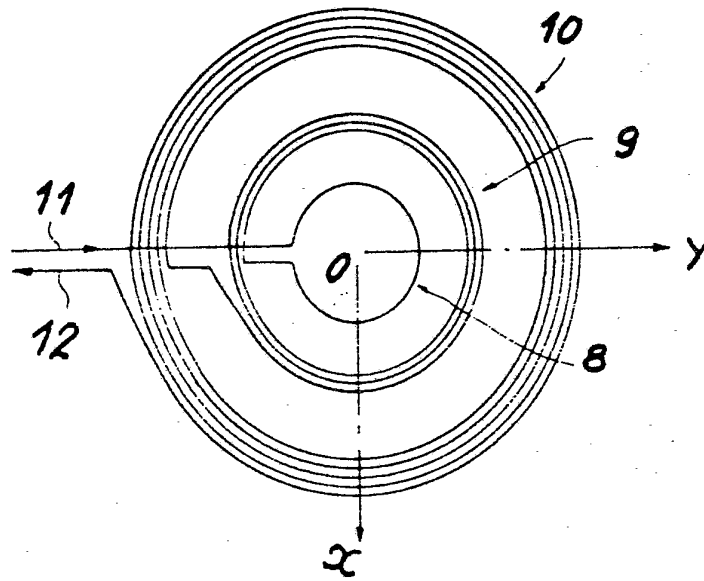


FIG. 4

3,4

FIG. 5

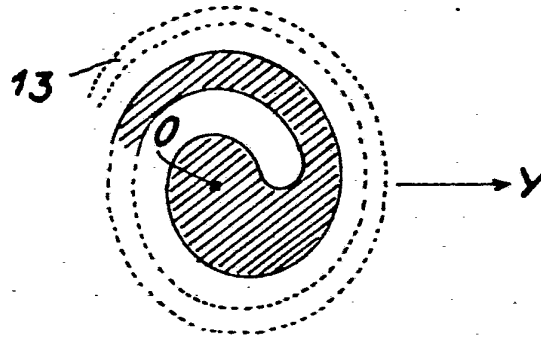


FIG. 6

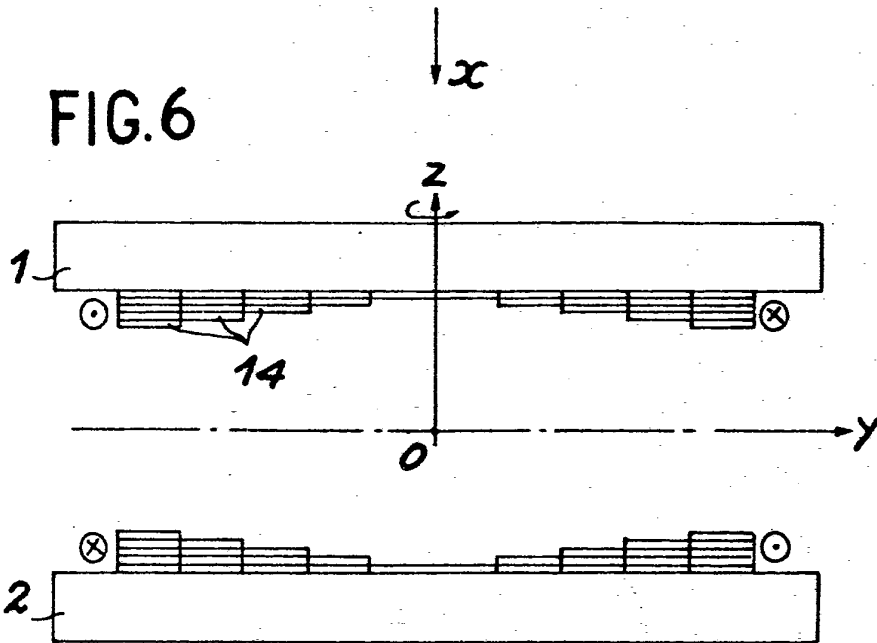
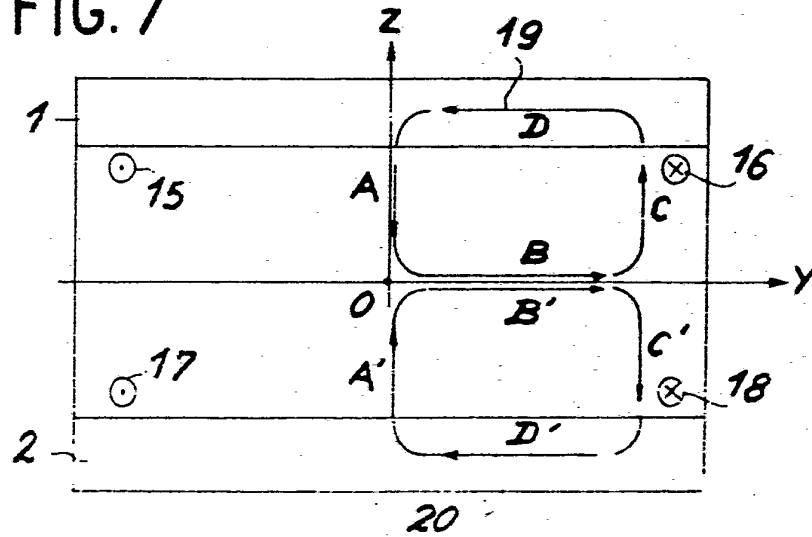


FIG. 7



4.4

