

Brevet N°	8 1 5 2 9
du	19 juillet 1979
Titre délivré :	

GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG



Monsieur le Ministre
de l'Économie Nationale et des Classes Moyennes
Service de la Propriété Industrielle
LUXEMBOURG

Demande de Brevet d'Invention

I. Requête

THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA, 2200 University Avenue, à BERKELEY, Etat de Californie, Etats-Unis d'Amérique, représenté par Monsieur Jacques de Muyser, agissant en qualité de mandataire

dépose ce dix-neuf juillet 1900 soixante-dix-neuf à 15 heures, au Ministère de l'Économie Nationale et des Classes Moyennes, à Luxembourg :

1. la présente requête pour l'obtention d'un brevet d'invention concernant :

"Procédé et appareil de détermination des densités de noyaux par écho de spin pour élaboration de tomogrammes".

déclare, en assumant la responsabilité de cette déclaration, que l'(es) inventeur(s) est (sont) : voir au verso

2. la délégation de pouvoir, datée de le

3. la description en langue française de l'invention en deux exemplaires ;

4. 9 planches de dessin, en deux exemplaires ;

5. la quittance des taxes versées au Bureau de l'Enregistrement à Luxembourg,

le 19 juillet 1979

revendique pour la susdite demande de brevet la priorité d'une (des) demande(s) de

brevet déposée(s) en/aux Etats-Unis d'Amérique

le 20 juillet 1978 (No. 926,571)

au nom de s inventeurs

élit domicile pour lui (elle) et, si désigné, pour son mandataire, à Luxembourg

35, bld. Royal

solicite la délivrance d'un brevet d'invention pour l'objet décrit et représenté dans les annexes susmentionnées, — avec ajournement de cette délivrance à 6 mois.

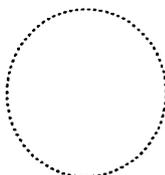
Le mandataire

II. Procès-verbal de Dépôt

La susdite demande de brevet d'invention a été déposée au Ministère de l'Économie Nationale et des Classes Moyennes, Service de la Propriété Industrielle à Luxembourg, en date du :

19 juillet 1979

à 15 heures



Pr. le Ministre
de l'Économie Nationale et des Classes Moyennes,
p. d.

Brevet N°	8 1 5 2 9
du	19 juillet 1979
Titre délivré :

GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG



Monsieur le Ministre
de l'Économie Nationale et des Classes Moyennes
Service de la Propriété Industrielle
LUXEMBOURG

Demande de Brevet d'Invention

I. Requête

THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA, 2200 University Avenue, à BERKELEY, Etat de Californie, Etats-Unis d'Amérique, (1)
représenté par Monsieur Jacques de Muyser, agissant en qualité de mandataire (2)

dépose ce dix-neuf juillet 1900 soixante-dix-neuf (3)
à 15 heures, au Ministère de l'Économie Nationale et des Classes Moyennes, à Luxembourg :

1. la présente requête pour l'obtention d'un brevet d'invention concernant :

"Procédé et appareil de détermination des densités de noyaux par écho de spin pour élaboration de tomogrammes". (4)

déclare, en assumant la responsabilité de cette déclaration, que l'(es) inventeur(s) est (sont) :
voir au verso (5)

2. la délégation de pouvoir, datée de le
3. la description en langue française de l'invention en deux exemplaires ;
4. 9 planches de dessin, en deux exemplaires ;
5. la quittance des taxes versées au Bureau de l'Enregistrement à Luxembourg,

le 19 juillet 1979
revendique pour la susdite demande de brevet la priorité d'une (des) demande(s) de
(6) brevet déposée(s) en (7) aux Etats-Unis d'Amérique
le 20 juillet 1978 (No. 926,571) (8)

au nom de s. inventeurs (9)
élit domicile pour lui (elle) et, si désigné, pour son mandataire, à Luxembourg
35, bld. Royal (10)

sollicite la délivrance d'un brevet d'invention pour l'objet décrit et représenté dans les annexes susmentionnées, — avec ajournement de cette délivrance à 6 mois.

Le mandataire

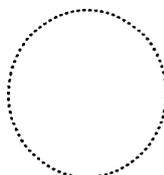

II. Procès-verbal de Dépôt

La susdite demande de brevet d'invention a été déposée au Ministère de l'Économie Nationale et des Classes Moyennes, Service de la Propriété Industrielle à Luxembourg, en date du :

19 juillet 1979

à 15 heures

Pr. le Ministre
de l'Économie Nationale et des Classes Moyennes,
p. d.



A 68007

(1) Nom, prénom, firme, adresse — (2) s'il y a lieu «représenté par ..» agissant en qualité de mandataire — (3) date du dépôt en toutes lettres — (4) titre de l'invention — (5) noms et adresses — (6) brevet, certificat d'addition, modèle d'utilité — (7) pays — (8) date — (9) déposant originaire — (10) adresse — (11) 6, 12 ou 18 mois.

*GoIN
A61B*

- 1.- Lawrence Eugene CROOKS, 5439 Sacramento Avenue, à RICHMOND,
Conté de Contra Costa, Etat de Californie, Etats-Unis d'Amérique
- 2.- John Charles HOENNINGER III, 20 Roanoke Road, à BERKELEY, Conté
de Alameda, Etat de Californie, Etats-Unis d'Amérique
- 3.- Mitsuaki ARAKAWA, 1120 East Hillsdale Blvd., FOREST CITY, Conté
de San Mateo, Etat de Californie, Etats-Unis d'Amérique

REVENDEICATION DE LA PRIORITE

de la demande de brevet / du modèle d'utilité

En ETATS-UNIS D'AMERIQUE

Du 20 JUILLET 1978

Mémoire Descriptif

déposé à l'appui d'une demande de

BREVET D'INVENTION

au

Luxembourg

au nom de : THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA.

pour : " Procédé et appareil de détermination des densités de noyaux par écho de spin pour élaboration de tomogrammes."

La présente invention concerne un procédé et un appareil de formation d'une image d'une coupe représentant des densités nucléaires relatives dans un objet. Plus précisément, elle concerne la mise en oeuvre des techniques de résonance magnétique nucléaire pour le relevé in vivo des lignes de densités de noyaux à la résonance, dans un être humain ou un autre animal.

Les techniques actuellement utilisées pour l'examen non traumatisant d'un corps mettent en oeuvre des rayons X (par exemple dans la tomographie assistée par ordinateur ou tacographie et des ultrasons. Un autre procédé non traumatisant met en oeuvre la résonance magnétique nucléaire RMN pour la formation d'une image d'une coupe donnant les densités des noyaux à l'intérieur d'un corps. Le numéro atomique moyen Z des noyaux présents dans les tumeurs a tendance à différer nettement de celui des tissus normaux. Les densités de noyaux d'hydrogène détectés par résonance magnétique nucléaire sont actuellement considérées comme un indicateur puissant des changements du numéro atomique moyen Z dans les tissus puisque l'hydrogène est le noyau de nombre de masse impair le plus abondant présent dans les tissus vivants. La résonance magnétique nucléaire convient parfaitement au relevé des densités relatives des noyaux d'hydrogène dans les tissus vivants.

Les principes de la résonance magnétique nucléaire sont bien connus dans leur généralité. Tous les noyaux ayant un nombre impair de protons et de neutrons (c'est-à-dire un nombre de masse impair) se comportent en fait comme de petits aimants. Lorsqu'ils sont disposés dans un champ magnétique externe permanent, l'axe magnétique des noyaux (et en conséquence des atomes) présente une précession correspondant à un certain angle par rapport à l'axe du champ imposé et il apparaît un moment magnétique ou "spin" à une fréquence dite de "Larmor". La fréquence de Larmor f_0 est reliée au champ magnétique B_0 au niveau du noyau suivant l'équation $f_0 = 2\pi\gamma B_0$ dans laquelle γ est une constante, le rapport gyromagnétique caractéristique d'un type particulier de noyau.

On sait que la direction du moment angulaire résultant ou "spin" d'un groupe de noyaux (et ainsi leur axe magnétique résultant) peut être réorientée par rapport au champ magnétique externe par des signaux électromagnétiques ayant une fréquence égale à la fréquence de Larmor. Le signal électromagnétique provoque

la nutation (réorientation) du spin résultant des noyaux à la résonance (fréquence de Larmor) d'une quantité correspondant à son amplitude et sa durée. Le sens de la nutation est fonction de la phase du signal électromagnétique par rapport à la précession nucléaire autour du champ magnétique imposé.

Si l'on suppose que les spins nucléaires sont initialement alignés et sont ensuite réorientés transversalement à la direction initiale, les orientations des axes magnétiques des noyaux qui changent provoquent l'induction d'un signal caractéristique à haute fréquence dans une bobine reliée à un récepteur de signaux à haute fréquence. La repolarisation (nouvel alignement par rapport au champ imposé) se manifeste ensuite avec un temps de relaxation (longitudinale) spin-réseau T_1 .

Lorsqu'il existe un gradient de champ magnétique dans un objet, ou lorsqu'il existe des défauts d'homogénéité dans le champ magnétique imposé, des noyaux ayant le même rapport gyromagnétique possèdent des fréquences différentes de Larmor suivant leurs positions dans l'objet. Un volume contenant des noyaux dans l'objet peut ainsi être considéré comme ayant une plage de fréquences de précession, centrée autour d'une fréquence donnée de Larmor.

Il est commode de considérer le procédé nucléaire décrit dans la suite à partir d'un système rotatif de référence qui tourne à la fréquence de Larmor, si bien qu'un moment magnétique nucléaire ayant une précession exactement à la fréquence de Larmor paraît fixe. Dans un tel système de référence, l'aimantation macroscopique M est alignée nominalement sur la direction du champ magnétique imposé B_0 (jusqu'à la réorientation).

Lorsqu'un nouvel alignement nucléaire est effectué, les phases relatives des spins individuels (la phase étant l'angle formé par la projection du spin sur un plan dans le système rotatif de référence, et un axe, disposé dans ce plan et passant par l'axe de rotation) commencent à diverger lorsque certains noyaux présentent une précession plus rapide et certains une précession plus lente que la fréquence centrale de Larmor. Ainsi, il apparaît un "déphasage" progressif des spins nucléaires individuels et une perte correspondante de la cohérence de phase. Initialement, après réorientation, une tension relativement intense est induite dans

les bobines réceptrices et diminue progressivement en amplitude étant donné les échanges d'énergie entre spins (constante de temps de relaxation spin-spin T_2) et le déphasage des spins, ces deux phénomènes étant caractérisés cumulativement par le temps de relaxation T_2^* . Ce signal représente la décroissance libre de toute induction ou simplement "décroissance libre".

On sait qu'un "écho de spin" ou une représentation ultérieure de la décroissance libre peut être créé par remise des spins en cohérence de phase.

Par exemple, lorsque, un temps après la réorientation des spins nucléaires (par exemple à 90° par rapport à une direction initiale), par une première impulsion électromagnétique de fréquence, d'amplitude et de durée convenables (appelée dans la suite impulsion à 90°), un autre signal électromagnétique de fréquence, d'amplitude et de durée convenables est appliqué afin que les spins nucléaires subissent une nutation de 180° (ce signal étant appelé impulsion à 180° dans la suite du présent mémoire), chaque spin individuel tourne en fait de 180° (dans le système rotatif de référence). Cela signifie que la phase est alors opposée à la phase accumulée avant l'impulsion à 180° . L'accumulation d'autres déphasages des spins nucléaires individuels est la même que précédemment et en conséquence, au temps 2τ (après la perturbation initiale) tous les spins individuels retrouvent à nouveau la cohérence de phase (la phase négative annule la phase nouvellement accumulée). De cette manière un "écho de spin" de la décroissance libre est créé. L'amplitude de crête de l'écho de spin dépend de la constante de temps de relaxation transversale T_2 . L'écho de spin est en fait une image spéculaire et l'écho de la décroissance libre centrés sur un temps postérieur du temps 2τ à la perturbation initiale.

Il faut noter que l'écho de spin présente toujours son maximum à une période suivant l'application de l'impulsion à 180° qui est égale à l'intervalle de temps compris entre l'application de la perturbation initiale (l'impulsion à 90° créant la décroissance libre) et l'application de l'impulsion à 180° . Ce phénomène est appelé dans la suite la "règle des temps égaux".

On peut se reporter à l'ouvrage de Farrar et Becker "Pulse and Fourier Transform NMR Introduction to Theory and Methods",

Academic Press, New York, 1971 pour la description plus détaillée des principes fondamentaux de la résonance magnétique nucléaire.

Bien qu'on ait utilisé depuis longtemps les techniques de résonance magnétique nucléaire pour la mesure des champs magné-
5 tiques et en analyse chimique, ce n'est que récemment que la technique a été appliquée à la formation d'image dans le domaine médical. De façon générale, les techniques de formation d'image par résonance magnétique nucléaire reposent sur l'hypothèse qu'on dispose volontairement un échantillon dans un
10 champ magnétique variable avec la position (un champ ayant une intensité qui varie en fonction de la position), les fréquences de Larmor des noyaux occupant des positions différentes présentant des différences correspondantes. Ainsi, une discrimination de fréquences est assurée entre les spins des atomes occupant des
15 positions différentes, et la densité de spins dans un volume unitaire ou élémentaire compris dans le volume excité de noyaux est représentée par une composante à une fréquence particulière de la décroissance libre.

Les techniques de formation d'image par résonance magné-
20 tique nucléaire entrent dans l'une des cinq catégories suivantes : la formation d'image à partir de projection, la technique FONAR, la formation d'image par points sensibles, la formation d'image suivant les transformations de Fourier, et la formation d'image par irradiation sélective.

25 La formation d'image par la technique de projection nécessite la formation d'une multiplicité de projections suivant différentes orientations, par exemple par création d'un gradient linéaire de champ dans l'objet et l'enregistrement d'une projec-
30 tion unidimensionnelle de la densité nucléaire dans la direction définie par le gradient. Une image est alors reconstituée à partir des projections, par des techniques mathématiques analogues à celles qui sont utilisées en tomographie mettant en oeuvre des rayons X, ce procédé étant décrit par exemple dans l'article de
Lauterbur, Nature, 242:190, mars 1973.

35 La technique FONAR met en oeuvre des champs magnétiques de configuration convenable, appliqués transversalement à l'objet afin que seule une petite fenêtre à la résonance, à l'intérieur de l'échantillon, donne un signal de résonance magnétique nucléaire.

La région sensible balaye alors l'objet, par exemple par déplacement physique. La technique FONAR est décrite par exemple dans l'article de "Focusing Nuclear Magnetic Resonance (FONAR)" Visualization of a Tumor in a Live Animal, Science, Vol. 194, p. 1430-1432, décembre 1976 et dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 3 789 832.

La technique de formation d'image par points sensibles, aussi appelée relevé de spin, est un procédé selon lequel le signal de résonance magnétique nucléaire provenant de volumes élémentaires particuliers est enregistré successivement. Un gradient de champ magnétique, alternant à une basse fréquence prédéterminée (de l'ordre de 50 Hz) est créé suivant un premier axe de l'objet. Le signal de résonance magnétique nucléaire de tous les éléments dans l'objet est alors modulé à la fréquence du changement de gradient, à l'exception des protons se trouvant dans le plan nul du gradient (plan de zéro). Des gradients alternatifs analogues peuvent être appliqués à des fréquences asynchrones suivant les axes transversaux afin qu'un point nul ou noeud soit formé en fait dans l'objet à l'intersection des plans nuls du gradient ou des noeuds. Un filtrage passe-bas convenable donne alors une indication correspondant au signal de résonance magnétique nucléaire provenant du point d'intersection des trois plans nuls. Un balayage de l'objet, suivant une trame, est obtenu par variation des gradients relatifs. Une telle technique de formation d'image par points sensibles est décrite dans l'article de Hinshaw, Journal of Applied Physics, vol. 47, n° 8, août 1976.

Un procédé par points sensibles multiples, mettant en oeuvre deux gradients alternatifs orthogonaux pour la formation d'une droite nulle et une chaîne d'impulsions cohérentes à haute fréquence, de phase régulièrement répartie et alternant, est suggéré dans l'article de Andrew et Col., "NMR" Images by Multiple Sensitive Point Method, Application to Larger Biological Systems", Phys. Med. Biol. 1977; vol. 22, n° 5, 971-974, 1977. Cet article indique que la transformation discrète de Fourier du signal reçu entre les impulsions à haute fréquence est utilisée pour la formation d'indices relatifs à la densité des protons suivant la droite d'intersection des deux plans de zéro de gradients alternatifs.

Les techniques de formation d'image par transformation

de Fourier mettent en oeuvre en général une impulsion initiale à haute fréquence pour la réorientation des spins des protons dans l'objet, de 90° . Pendant le signal résultant de décroissance libre, l'objet est soumis à des gradients successifs appliqués
5 consécutivement et très rapidement le long de trois axes cartésiens principaux du système. Le signal de décroissance libre est échantillonné en présence du dernier gradient appliqué, et une transformation tridimensionnelle de Fourier est réalisée afin qu'une image tridimensionnelle soit formée. On connaît aussi deux
10 procédés mettant en oeuvre une transformation bidimensionnelle de Fourier. L'article de Kumar et col., "NMR Fourier Zeugmatography" Journal of Magnetic Resonance 18:69-83 (1975) décrit ces techniques mettant en oeuvre les transformations de Fourier dans le cas de la résonance magnétique nucléaire.

15 Les techniques de formation d'image par irradiation sélective impliquent l'utilisation d'une séquence d'impulsions électromagnétiques ayant des spectres prédéterminés de fréquences. Un premier gradient magnétique est appliqué suivant un axe donné et l'objet est irradié par une séquence d'impulsions électromagné-
20 tiques ayant un spectre combiné de fréquences d'intensité égale à toutes les fréquences de Larmor dans l'objet, à l'exception d'une bande étroite. A la suite de l'irradiation, tous les noyaux présents dans l'objet, à l'exception de ceux de la bande étroite, sont saturés. Les atomes à saturation ne sont donc plus sensibles
25 à d'autres signaux électromagnétiques pendant un temps de l'ordre de la constante de temps de relaxation spin-réseau T_1 . Le premier gradient magnétique est remplacé par un gradient en direction orthogonale et l'objet est à nouveau irradié par une séquence d'impulsions électromagnétiques ayant cette fois une largeur de
30 bande correspondant à une bande élémentaire particulière dans le plan non saturé. La seconde séquence d'impulsions provoque la nutation des spins des atomes dans la bande prédéterminée d'un angle de 90° avec création d'une décroissance libre. Cette décroissance libre est alors enregistrée en présence d'un gradient magné-
35 tique dans la troisième direction orthogonale (suivant la direction de la bande) et une transformation de Fourier est utilisée afin que la répartition de densités nucléaires suivant cette ligne droite soit déterminée. Le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 4 021 726

décrit plus en détail la formation d'image par irradiation sélective.

On peut aussi se référer, pour la description des techniques de formation d'image par résonance magnétique nucléaire citées précédemment ou différentes aux articles

5 suivants de P.C. Lauterbur et al., "Magnetic Resonance Zeugmatography" 18th Amper. Conf. 1974; de P. Mansfield, P.K. Grannel & A.A. Maudsley, "Diffraction and Microscopy in Solids by NMR", 18th Amper. Conf. 1974, p. 431-432 ; de P.C. Lauterbur, "Magnetic

10 Resonance Zeugmatography", de P.C. Lauterbur, "Flow Measurements by NMR Zeugmatography", 24 octobre 1973, de P.C. Lauterbur, "Stable Isotope Distributions by NMR", Proc. First International Conf. on Stable Isotopes Conf. 730525, 9-18 mai 1973, p. 255-260, de Lauterbur, "Image Formation by Induced Local Interactions :

15 Exemples Employing Nuclear Magnetic Resonance", Nature, Vol. 242, 16 mars 1973, p. 190-191, de P.C. Lauterbur et col., "ESR Zeugmatography - Distributions of Unpaired Electrons Within Objects", Gordon Conf. 12-16 août 1974, de P.C. Lauterbur et col., "In Vivo Studies of Cancer by NMR Zeugmatography", Gordon Conf. 12-16 août

20 1974, de P.C. Lauterbur, "Reconstruction in Zeugmatography - The Spatial Resolution of Magnetic Resonance Signals", Intl. Workshop on 3-D Image Reconstruction Techniques, 16-19 juillet 1974, de A.N. Garroway, "Velocity Profile Measurements by NMR", 18th Amper. Conf. 1974, p. 435-436, de W.S. Hinshaw, "The Application of Time

25 Dependent Field Gradients to NMR Spin Mapping", 18 th Amper. Conf. 1974, p. 433-434, de J.M.S. Hutchinson, J.R. Mallard & C.C. Goll, "In Vivo Imaging of Body Structures Using Proton Resonance", 18th Amper. Conf. 1974, p. 283-284, de P. Mansfield & A.A. Maudsley, "Line Scan Proton Spin Imaging in Biological Structures by NMR",

30 Phys. in Medicine and Biology 21 n° 5 (1976), p. 847-852, de P.K. Grannel, "NMR Body Images", Physics Bulletin, mars 1976, p. 95-96, de P.C. Lauterbur, D.M. Krammer, W.V. House, C. Chen, "Zeugmatography High Resolution NMR Spectroscopy, Images of Chemical Inhomogeneity Within Macroscopic objects", American Chemical Society

35 Journal, 97:23, 12 novembre 1975, de P. Mansfield & P.K. Grannel, "Diffraction and Microscopy in Solids and Liquids by NMR", Physical Review B, vol. 12, n° 9, 1er novembre 1975, p. 3618-3634, de P. Mansfield, A.A. Maudsley & T. Baines, "Fast Scan Proton Density Imaging by NMR", J. of physics E, vol. 9, 1976, _____

- p. 271-278, de P.C. Lauterbur, "Bibliography on Magnetic Resonance Zeugmatography", 3 juin 1975, de A.N. Garroway, P.K. Grannel & P. Mansfield, "Image Formation in NMR by a Selective Irradiative Process", J. Phys. C : vol. 7, 1974, p. 457-462, de A. Kumar, D. Welt & R. Ernst, "NMR Fourier Zeugmatography", J. Mag. Res. 18, 69-83 (1975), de P. Mansfield & A.A. Maudsley, "Medical Imaging by NMR", British Journal of Radiology 50, 188-194 (1977), de D.I. Hoult, "Zeugmatography : A criticism of the Concept of a Selective Pulse in the presence of a Field Gradient", J. Mag. Res. 26, 165-167 (1977), de P. Mansfield & A.A. Maudsley, "Planar Spin Imaging by NMR", J. of Physics C. vol. 9, 1976, p. L409-412, de P. Mansfield, "Proton Spin Imaging by Nuclear Magnetic Resonance", Contemporary Physics, vol. B, n° 6, 1976, p. 553-576, de R. Damadian et col., "Field Focusing Nuclear Magnetic Resonance (FONAR) : Visualization of a Tumor in a Live Animal", Science, vol. 194, 24 décembre 1976, p. 1430-1431, E.R. Andrew, "Zeugmatography", IVth Amper. Summer School, septembre 1976, de W.S. Hinshaw, "Image Formation by nuclear Magnetic Resonance : The Sensitive-Point Method", J. of Applied Physics, vol. 47, n° 8, août 1976, de R. Damadian, M. Goldsmith & L. Minkoff, "NMR in Cancer : XVI FONAR Image of the Live Human Body", Physiol. Chem. and Phys. 9, (1977) p. 97-108, de G.N. Holland & P.A. Bottomley, "A Colour Display Technique for NMR Imaging", J. of Physics E : 10 (1977), p. 714-716, de T. Baines & P. Mansfield, "An Improved Picture Display for NMR Imaging", Journal of Physics E : Scientific Instruments 9 (1976), p. 809-811, de E.R. Andrew et col. "NMR Images by the Multiple Sensitive Point method : Application to Larger Biological Systems", Physics in Medicine and Biology 22, n° 5, 971-974 (1977), de L. Minkoff, R. Damadian, T.E. Thomas, N. Hu, M. Goldsmith, J. Koutcher & M. Stanford, "NMR in Cancer : XVII. Dewar for a 53-Inch Superconducting NMR Magnet", Physiol. Chem. and Phys. 9 (1977), p. 101-109, de Ros Herman, "NMR Makes Waves in Medical Equipment Companies", New Scientist, 12 janvier 1978, de L.E. Crooks, T.P. Grover, L. Kaufman & J.R. Singer, "Tomographic Imaging with Nuclear Magnetic Resonance", Investigative Radiology, 13, 63, janvier-février 1978, de W.S. Hinshaw, P.A. Bottomley & G.N. Holland, "Radiographic Thin-Section Image of the Human Wrist by Nuclear Magnetic Resonance", Nature, vol. 270, n° 22,

29 décembre 1977, p. 722-723, et de T.C. Farrar & E.D. Becker, "Pulse and Fourier Transform NMR - Introduction to Theory and Methods", Academic Press, 1971, New York, p. 1-33.

Les brevets des Etats-Unis d'Amérique n° 3 975 675, 4 021 726, 4 015 196, 4 034 191, 3 789 832, 3 932 805, 3 651 396 et 3 999 118, concernent aussi de telles techniques.

Il faut noter que chacune des techniques précitées présente des inconvénients dans différents domaines. Par exemple, les techniques de formation d'une image à partir de projections nécessitent un traitement mathématique très important des données. La technique FONAR nécessite apparemment soit une installation extrêmement complexe pour le balayage du champ magnétique, soit un dispositif quelconque permettant un mouvement relatif entre le champ et le sujet.

Les techniques mettant en oeuvre une transformation de Fourier de type tridimensionnel nécessitent que tous les plans soient balayés simultanément plusieurs fois afin que les données soient suffisantes pour que celles qui correspondent aux divers plans puissent être séparées mathématiquement. Dans les techniques mettant en oeuvre une transformation de Fourier de type bidimensionnel, la fréquence de répétition est limitée par le temps de relaxation spin-réseau T_1 des noyaux car chaque irradiation affecte la totalité du système des spins. En outre, une capacité importante de mémoire est nécessaire dans un ordinateur.

Les techniques de formation d'image par irradiation sélective selon lesquelles la totalité de l'objet est saturée à l'exception d'un plan unique présente des inconvénients car les installations correspondantes ne peuvent pas être adaptées à un balayage séquentiel rapide de plusieurs plans. Ainsi, avant qu'un second plan puisse être adressé, un temps suffisant doit s'écouler pour que l'objet cesse d'être saturé.

L'invention concerne une technique d'irradiation sélective de l'objet par des impulsions électromagnétiques permettant la création d'échos de spin (et non la détection des signaux de décroissance libre) pour un balayage rapide et facile de plusieurs plans.

Le phénomène des échos de spin est bien connu comme indiqué précédemment. Cependant, jusqu'à présent, on a utilisé

essentiellement l'écho de spin pour la mesure de la constante de temps de relaxation transversale T_2 d'un échantillon. Un exemple de système mettant en oeuvre les échos de spin pour la mesure du temps de relaxation T_2 lors du relevé des formations terrestres traversées par un trou de forage, est décrit dans le brevet des
5 Etats-Unis d'Amérique n° 3 128 425. De manière analogue, le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 3 213 355 décrit un système de mesure des dimensions d'un récipient, mettant en oeuvre les échos de spin pour la détermination de la constante de temps de
10 relaxation transversale T_2 .

L'article de Mansfield and Maudsley, "Planar Spin Imaging by NMR", J. Phys. C : Solid State Physics, vol. 9, 1976, cité précédemment, paraît indiquer que, après la décroissance libre, différents arrangements de refocalisation de signaux
15 (impulsions sélectives de 180 et 90° et diverses combinaisons avec inversion du gradient de champ) peuvent être utilisés pour le rappel du signal en vue de la formation d'une moyenne. Le mécanisme particulier des arrangements de refocalisation n'est cependant pas décrit dans l'article. De manière analogue, le bre-
20 vet des Etats-Unis d'Amérique n° 3 781 650 paraît décrire un spectromètre de résonance magnétique nucléaire dans lequel les signaux de décroissance libre et les échos de spin sont combinés en vue de la réduction des interférences.

La communication précitée de Hoult (Journal of Magnetic
25 résonance, 26 : 165-167 (1977)) indique que les techniques d'irradiation sélective violent le "principe d'incertitude" à moins que des défauts de linéarité, présents dans le système de résonance magnétique nucléaire, soient exploités. Cet auteur indique qu'une impulsion sélective rectangulaire comprend un spectre large
30 de fréquences et que, pendant le temps d'application de l'impulsion, les spins perturbés présentent un déphasage. Cependant, cet article indique aussi que cette situation n'est pas irréversible car, si le gradient de champ est inversé après l'impulsion, un écho de celle-ci est formé et, au milieu de l'écho pour les impul-
35 sions à petit déphasage, tous les spins sont en phase.

Cette communication de Hoult implique que la configuration de la région choisie est essentiellement identique à celle du spectre d'irradiation sélective. Cependant, on note selon

l'invention que, comme la réponse des spins nucléaires au champ magnétique à haute fréquence n'est pas linéaire, la configuration du volume choisi ne correspond pas exactement à celle du spectre du champ magnétique excitateur à haute fréquence. Par exemple, un spectre ayant un bloc parfaitement rectangulaire de fréquences provoque l'excitation d'un volume qui recouvre une plage de fréquences légèrement plus large que ce bloc de fréquences, et les bords du volume excité sont inclinés et non verticaux. La configuration du volume excité peut être calculée à l'aide des équations de Block, décrites dans l'article précité de Farrar et Becker, p. 7 & 8, avec un champ magnétique à haute fréquence dépendant du temps de façon appropriée, ayant le spectre de fréquences considéré. L'utilisation des équations de Block détermine aussi le déphasage de spin qui se manifeste pendant l'impulsion à haute fréquence. On peut ainsi montrer que la suggestion de Hoult de l'inversion du gradient peut être utilisée même pour les angles de perturbation qui ne sont pas petits. Pour un angle de perturbation de 90° , l'inversion de gradient nécessaire à l'obtention d'un signal maximal à partir des spins du volume choisi, est un gradient inversé de même intensité que le gradient original mais dont la durée est à peu près égale à la moitié de la durée de l'irradiation. La durée du gradient inverse dépend de la configuration de l'impulsion à haute fréquence. L'effet de ce gradient inverse est de regrouper la plupart des spins qui ont présenté un déphasage pendant l'irradiation sélective. Comme le déphasage pendant cette irradiation n'est pas linéaire, la remise en phase n'est pas parfaite mais elle est importante. Après la fin du gradient inversé, on dispose d'un signal qu'on considère comme étant un signal de décroissance libre bien que Hoult l'appelle "écho". L'autre angle important de perturbation qui est fréquemment utilisé est 180° . Une irradiation sélective pour cette valeur ne nécessite pas de correction de la phase. La raison en est que le déphasage de spin pendant les 90° initiaux de la perturbation est annulé par la remise en phase dans la seconde partie de 90° de la perturbation.

L'inversion du gradient après une irradiation sélective constitue l'un des types de correction de phase nécessaire à la mise en oeuvre des techniques de relevé linéaire décrites dans

le présent mémoire. L'application d'un gradient inverse pendant une période égale à peu près à la moitié de la durée de l'irradiation sélective est appelée, dans la suite du présent mémoire, une correction de phase de type I. En pratique, la surface comprise sous la forme d'onde représentant le gradient de correction en fonction du temps est le facteur primordial. Lorsque le gradient de correction a une intensité double, il doit être appliqué seulement pendant la moitié du temps. Cette caractéristique s'applique à tous les types de corrections de phase et la description n'indique l'exemple des intensités égales que par raison de simplicité. Un second type de correction de phase, appelé correction de type II, est la correction immédiate pour une impulsion de gradient qui vient juste de se terminer ; l'étalement de la phase qui apparaît dans les parties de l'objet qui ne sont pas soumises à une irradiation sélective pendant l'application de cette impulsion de gradient, est corrigé par l'application immédiate d'un gradient égal et de sens opposé, pendant le même temps que l'impulsion originale de gradient. Une extension de la correction de phase de type II est l'introduction d'un temps de retard avant application du gradient de correction. Des événements tels que des échos de spin peuvent être observés pendant ce temps de retard. Une telle correction de phase dans laquelle le gradient de polarité opposée est appliqué après un temps de retard, est appelée correction de phase de type III. Un autre type de correction de phase, appelé type IV, est analogue à la correction de type III, mais une impulsion à haute fréquence à 180° est appliquée au volume intéressant pendant la période comprise entre l'application du gradient original et l'application du gradient de correction si bien que la polarité du gradient de correction est la même que celle du premier gradient. Le gradient de correction a la même polarité que le premier gradient étant donné que l'impulsion intermédiaire à haute fréquence de 180° rend les phases négatives.

L'invention concerne un procédé de formation d'image par irradiation sélective dans lequel l'analyse directe de l'écho de spin (différente de l'analyse de la décroissance libre) permet un balayage successif rapide de plusieurs plans (volumes de forme étalée) à l'intérieur de l'objet. Des plans parallèles

en nombre prédéterminé sont excités successivement d'une manière sélective afin que les spins des atomes (noyaux) placés à l'intérieur se réorientent d'environ 90° . Des plans transversaux en nombre prédéterminé, à l'intérieur de l'objet, sont alors

5 excités sélectivement afin que les spins des atomes contenus se réorientent de 180° . Les noyaux placés aux intersections des plans réorientés à 90° et des plans réorientés à 180° produisent ensuite des signaux d'écho de spin à des moments correspondant à la règle des temps égaux. Les signaux d'écho de spin sont

10 ainsi créés pendant une séquence de périodes correspondantes. La mesure des échos de spin en présence d'un champ magnétique variant avec la position le long de la ligne d'intersection permet la détermination des densités de spin des volumes unitaires à chaque intersection individuelle, par transformation de Fourier des

15 signaux correspondants d'écho de spin.

Lorsque les jeux de lectures répétées d'une ligne particulière sont effectués trop souvent, les effets du temps de relaxation T_1 réduisent l'intensité des signaux provenant des volumes unitaires. Ainsi, l'intensité du signal indique les effets

20 combinés de la densité de spin et de la constante de relaxation T_1 . Les volumes élémentaires correspondant à des constantes importantes T_1 ont des densités "apparentes" de spin inférieures à la densité normale. Les éléments de volumes ayant des constantes T_1 courtes, présentent très peu de variations par rapport à leur

25 densité véritable de spin. Cet effet permet la construction d'une image de constante T_1 par formation de plusieurs images de densité "apparente" de spin, par mise en oeuvre de temps de plus en plus courts entre les jeux de lectures répétées. La réduction de la

30 densité apparente en fonction du temps entre les lectures répétées peut être utilisée pour le calcul de la constante de temps T_1 de chaque élément de volume. Les constantes T_1 de tous les éléments de volume peuvent alors être utilisées pour la formation d'une image de constante T_1 de l'objet.

35 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront mieux de la description qui va suivre, faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :

les figures 1A à 1D sont des schémas en perspective d'un objet soumis à des séquences de détermination des signaux

d'écho de spin par balayage, avec une seule raie, selon l'invention ;

la figure 2 est un diagramme des temps illustrant la séquence de signaux d'écho de spin sélectifs des figures 1A à 1D ;

la figure 3 est un graphique schématique représentant la séquence de signaux d'écho de spin indiquée en référence aux figures 1A à 1D et 2 ;

les figures 4A à 4C sont des perspectives schématiques d'un objet soumis à une séquence de balayages donnant des signaux d'écho de spin à plusieurs raies ;

la figure 5 est un diagramme des temps représentant une séquence de balayages donnant des signaux d'écho de spin à deux raies ;

les figures 6 et 7 sont des graphiques schématiques représentant d'autres séquences de signaux d'écho de spin à plusieurs raies selon l'invention ;

les figures 8, 9 et 10 sont des graphiques schématiques représentant des séquences de balayages donnant des signaux d'écho de spin selon l'invention, et mettant en oeuvre une copie ;

les figures 11a et 11b forment ensemble un diagramme synoptique, constituant la figure 11, d'un appareil destiné à créer les séquences de balayages de signaux d'écho de spin selon l'invention ;

la figure 12 est une perspective étalée d'une partie de l'appareil des figures 11a et 11b ; et

la figure 13 est un diagramme synoptique d'un démodulateur et d'un circuit générateur de déphasage et synthétiseur de fréquence, du type représenté sur les figures 11a et 11b formant la figure 11.

On considère maintenant, en référence aux figures 1A à 1D et 2, une séquence de balayage avec formation de signaux d'écho de spin, permettant la détermination de la densité normale ou modifiée de constante T_1 des spins nucléaires (appelée dans le présent mémoire "densité de spin") dans un volume élémentaire 11 contenu dans un objet 10. Un appareil qui convient à la mise en oeuvre de cette séquence de balayage de signaux d'écho de spin est décrit dans la suite en référence aux figures 11a et 11b, 12

et 13.

La première étape dans la séquence de balayage, comme dans les autres techniques de formation d'image en résonance magnétique nucléaire, est l'alignement initial des spins nucléaires dans l'objet 10. A cet effet, un champ magnétique intense B_0 est créé par exemple suivant la direction Z d'un système nominal de coordonnées cartésiennes centrées dans l'alignement de l'objet 10 (figure 1A). Comme indiqué précédemment, les spins nucléaires des atomes ont des fréquences de Larmor proportionnelles au champ magnétique agissant sur eux et ont tendance à s'aligner sur le champ magnétique B_0 .

Ensuite, un volume particulier interne à l'objet 10 est excité afin que les spins des atomes compris dans le volume présentent une nutation vers une orientation transversale, de préférence à 90° . Il faut se rappeler que les noyaux ayant des spins à une fréquence donnée de Larmor ne sont sensibles qu'aux signaux électromagnétiques extérieurs pratiquement à cette même fréquence de Larmor. Ainsi, si l'objet 10 est soumis à un champ magnétique qui varie avec la position, par exemple suivant un gradient magnétique dans la direction X, tel que $g_x = \delta B_z / \delta x$, les noyaux placés dans les divers plans Y-Z (volumes étalés), ayant des positions différentes le long de l'axe X, ont des fréquences différentes de Larmor. Un plan unique Y-Z peut ainsi être adressé par irradiation de l'objet 10 (en présence du champ variant avec la position X), à l'aide d'un signal électromagnétique dont le spectre de fréquences correspond à la fréquence particulière de Larmor de ce plan. Evidemment, en pratique, le volume adressé contenant les atomes a une dimension X finie et en conséquence comprend les spins ayant les fréquences de Larmor d'une largeur de bande prédéterminée.

Ainsi, après alignement initial des spins par le champ B_0 , un champ magnétique variant dans la direction X, avantageusement avec un gradient g_x (figure 2) est créé dans l'objet 10 et donne une différence de fréquences de Larmor suivant l'axe X. En présence du gradient g_x , un volume étalé particulier 12 (figure 1B) à l'intérieur de l'objet 10 est adressé par irradiation de cet objet avec une impulsion électromagnétique X_1 à 90° , ayant un spectre de fréquences comprenant pratiquement les composantes

correspondant aux fréquences de Larmor des atomes placés dans ce volume étalé ou plan 12.

La relation entre l'impulsion X_1 à 90° et le gradient g_x est indiquée sur la figure 2. Il faut noter que cette figure (ainsi que la figure 5) représente la présence ou l'absence du gradient et non la configuration ou forme du gradient lui-même.

Pour simplifier la description, on adopte les conventions suivantes. Le processus d'irradiation de l'objet par un signal électromagnétique de spectre prédéterminé de fréquences, en présence d'un champ variant avec la position, pour l'excitation d'un volume prédéterminé de noyaux, est appelé processus d'irradiation sélective dans la suite du présent mémoire. De manière analogue, les volumes étalés dans lesquels les spins nucléaires sont réorientés de 90 ou 180° sont appelés plans à 90° et plans à 180° respectivement.

Comme indiqué précédemment, les spins nucléaires, dans le volume 12, après l'impulsion X_1 à 90° et la correction de phase de type I $-g_x$, sont initialement alignés et à 90° respectivement par rapport à l'orientation originale et induisent une tension relativement intense dans une bobine placée autour de l'axe X. Cependant, la tension induite diminue au cours du temps lorsque les phases des spins, pour les différentes positions dans le volume 12, s'étalent. Le signal de décroissance libre DL créé par les noyaux présents dans le volume 12 à la suite de l'impulsion à 90° X_1 , est représenté sur la figure 2.

Ensuite, une correction de phase de type IV est appliquée au gradient g_{z_1} . Ce gradient est appliqué afin que les phases s'étalent suivant la direction Z, de manière qu'elles puissent être refocalisées par le gradient g_{z_2} pendant la première moitié de la lecture de l'écho de spin. Le gradient g_{z_1} a la même surface que la première moitié du gradient g_{z_2} . La figure 2 représente le gradient g_{z_1} qui ne recouvre pas un autre gradient, pour une simplification de la représentation du signal de décroissance libre DL. Il est possible que les gradients g_{z_1} et $-g_x$ se recouvrent, sans effet nuisible sur l'écho de spin, et avec une réduction du temps nécessaire pour la séquence.

L'étape suivante de la séquence de balayage d'écho

de spin est une rotation de 180° des spins nucléaires dans un volume transversal au volume 12 et recoupant ce dernier de manière que le volume élémentaire 11 soit commun aux deux volumes. Un champ magnétique variant avec la position dans la direction Y, avantageusement un gradient $g_Y = \delta B_Z / \delta Y$, est donc créé dans l'objet 10, et un volume étalé ou plan prédéterminé X-Y portant la référence 14 sur la figure 1C est excité par une impulsion Y_1 à 180° ayant un spectre de fréquences qui correspond à la bande des fréquences de Larmor des noyaux présents dans le volume 14. Ainsi, les phases des spins des noyaux à l'intérieur du volume 14 sont inversées et le volume 14 devient un plan à 180° .

L'effet de l'inversion de phase sur les noyaux communs aux deux plans 12 et 14 (appelés volume 16 d'intersection sur la figure 1D) est un regroupement des phases des spins. Ainsi, un écho de spin (figure 2) est créé par le volume 16 d'intersection.

Si l'on se réfère brièvement à la figure 3, on note que l'impulsion Y_1 à 180° constitue en fait une réflexion du signal 22 de décroissance libre. Lorsque les phases commencent à se regrouper, une réflexion du signal de décroissance est formée et un signal maximal est créé au temps de 2τ , τ étant égal au temps compris entre la création de l'impulsion X_1 à 90° et la création de l'impulsion X_1 à 180° , suivant la règle des temps égaux. Les phases des spins s'étalent ensuite et le signal d'écho de spin décroît comme décroît le signal de décroissance libre. Comme décrit dans la suite, la règle des temps égaux peut être utilisée dans un système à balayage à plusieurs raies pour la formation de signaux d'écho de spin sans interférence correspondant aux différentes raies. En outre, lorsque le signal d'écho de spin a une amplitude inférieure au signal de décroissance linéaire étant donné la constante de temps T_2 de relaxation transversale, l'effet de réflexion donne une période d'échantillonnage double pour la collecte des données.

Le signal d'écho de spin est enregistré en présence d'un champ magnétique variant avec la position, l'intensité du champ magnétique variant en fonction de la position le long de la courbe d'intersection. Comme indiqué en référence aux figures 1A à 1D et 2, les densités individuelles de spins des volumes unitaires dans le volume intersection 16 sont déterminées par

application à l'objet 10 d'un champ magnétique variant avec la position suivant la direction Z, avantageusement avec un gradient $g_z = \delta B_z / \delta z$ (figure 2) pendant la période dans laquelle le signal 24 d'écho de spin est formé. Le signal d'écho de spin est échantillonné et la transformée de Fourier du signal échantillonné est déterminée afin que l'intensité des diverses composantes de fréquences du signal d'écho de spin soit mesurée. La densité de spin du volume unitaire particulier 11 est ainsi représentée par l'intensité de la composante de fréquences correspondant à la fréquence particulière de Larmor de ce volume élémentaire.

Lorsque le gradient g_z est tel que sa contribution au champ B_z est nulle au centre du volume 16 d'intersection, les volumes élémentaires à des distances Z égales de part et d'autre du centre ont des fréquences de Larmor qui correspondent à des différences égales au-dessus et au-dessous de la fréquence centrale de Larmor. Les composantes démodulées du signal provenant de ces volumes élémentaires sont à des fréquences égales et opposées et peuvent donc être séparées par les techniques classiques de détection de quadrature, comme décrit dans la suite.

La séquence de balayage de signaux d'écho de spin décrite précédemment est particulièrement avantageuse car elle convient facilement à un balayage rapide à plusieurs raies. L'adressage sélectif d'une séquence de plans à l'aide d'impulsions à 90° puis l'adressage successif de plans transversaux choisis à l'aide d'impulsions à 180° permettent l'utilisation d'une séquence synchronisée de signaux d'écho de spin provenant de plusieurs raies ou lignes d'intersection. La règle précitée des temps égaux permet une discrimination dans le temps entre les échos respectifs de spins. On considère à titre illustratif une séquence à deux lignes ou raies en référence aux figures 4A à 4C et 5.

Comme dans la séquence de balayage à une seule ligne, un premier plan 12 (figure 4A) est adressé par une impulsion X_1 à 90° en coopération avec un gradient $X g_x$ (figure 5). Ensuite, les opérations successives d'irradiation sélective sont mises en oeuvre afin qu'elles provoquent des inversions de phase dans les plans transversaux 14A et 14B (figure 4B). Comme indiqué sur la figure 5, un champ magnétique variant avec la position Y,

avantageusement de gradient g_{Y_1} , est créé dans l'objet 10 et une impulsion Y_1 à 90° ayant un spectre convenable de fréquences, est appliquée afin qu'elle excite sélectivement le volume 14A à 180° . Un second plan X-Z 14B est excité par une opération
 5 d'irradiation sélective mettant en oeuvre une seconde impulsion Y_2 à 180° et un gradient g_{Y_2} , suivant une relation temporelle prédéterminée par rapport aux impulsions X_1 et Y_1 . Le plan X-Z 14B est choisi à une position Y différente de celle du plan 14A par décalage convenable du spectre de fréquences de l'impulsion
 10 Y_2 à 189° par une fréquence convenable ΔF , par modification du champ magnétique principal B_0 d'une quantité prédéterminée ΔB (le déplacement ΔB provoque un déplacement de la fréquence relative de Larmor dans l'objet), ou par une combinaison des deux. Le procédé mettant en oeuvre ΔB est schématiquement indiqué sur
 15 la figure 5.

Les noyaux communs au plan à 90° et au plan à 180° , c'est-à-dire des volumes intersection X_1Y_1 et X_1Y_2 (figure 4C) donnent des signaux respectifs d'échos de spin (aussi désignés par les références X_1Y_1 et X_1Y_2 sur la figure 5) à des moments
 20 correspondants à la règle des temps égaux. Les signaux d'échos de spin sont enregistrés en présence de champs magnétiques variant avec la position, de gradients g_{Z_1} et g_{Z_2} (figure 5) respectivement afin qu'une différence de fréquences de Larmor soit imposée le long de la ligne d'intersection. Les transformées
 25 de Fourier des signaux d'échos de spin enregistrés sont alors effectuées afin que des valeurs des densités de spins, modifiées ou non par la constante T_1 , des volumes unitaires des volumes intersection soient déterminées.

Il faut noter que les échos respectifs de spin X_1Y_1 et X_1Y_2 apparaissent à des périodes qui suivent l'impulsion Y_1 et l'impulsion Y_2 respectivement, égales aux périodes comprises entre les impulsions Y_1 et X_1 et entre les impulsions Y_2 et X_1 . Ainsi, la synchronisation convenable des impulsions Y_1 et Y_2 permet l'apparition des échos de spin X_1Y_1 et X_1Y_2 avec un inter-
 30 valle voulu de temps si bien que la discrimination entre les raies peut être obtenue.
 35

Les phases des spins des noyaux autres que ceux qui se trouvent dans les plans choisis de manière instantanée s'étalent

du fait de l'exposition aux gradients magnétiques correspondants. Un étalement parasite de phases dû aux gradients et aux gradients de champ magnétique ΔB est corrigé par application de différents types de corrections de phase. Par exemple, comme indiqué sur la figure 5, le gradient g_x est la correction de phase de type I nécessaire après une irradiation sélective à 90° . Le gradient g_{y1} provoque un étalement des phases dans le plan 14B à 180° avant l'impulsion Y_2 et le gradient g_{y2} provoque un étalement des phases dans le plan 14A à 180° après l'impulsion Y_1 . La correction de cet étalement parasite des phases doit être réalisée avant la création d'un signal d'écho de spin à partir des noyaux qui se trouvent dans le plan affecté. Ainsi, pour éviter des erreurs dues à un étalement erroné de phases d'un signal d'écho de spin X_1Y_1 , on applique un gradient négatif $-g_{y2}$ (type II) juste après la fin du gradient g_{y2} . Cependant, le gradient négatif $-g_{y2}$ affecte le plan 14B après l'impulsion Y_2 et doit lui-même être corrigé. La correction des effets des gradients g_{y1} et g_{y2} sur le plan 14B et ainsi l'écho X_1Y_2 est assurée par application d'un gradient g_{y3} de correction de type IV et d'un gradient g_{y4} de correction de type III respectivement. La première moitié du gradient de lecture g_{z1} doit refocaliser les phases de spins pour la formation d'un écho. Cette opération nécessite que les spins soient défocalisés au début de la séquence. Le gradient g_{z0} remplit cette fonction. La surface due au gradient g_{z0} est égale à la moitié de celle du gradient g_{z1} si bien que la refocalisation est complète au centre de l'écho. La première moitié du gradient g_{z1} est en fait une correction de phase de type IV pour le gradient g_{z0} . Ce dernier peut être appliqué en même temps que le gradient $-g_x$.

Les effets d'étalement des phases de la seconde moitié du gradient g_{z1} sur le plan 14B sont corrigés par application d'un gradient négatif $-g_{z1}$ (correction de phase de type II). L'écho de spin est refocalisé pendant cette correction et des échantillons prélevés pendant cette période peuvent être utilisés pour la formation d'une moyenne du signal.

La figure 6 représente schématiquement une séquence de balayage d'écho de spin à trois lignes ou raies. Une impulsion X_1 à 90° est appliquée au temps t_0 (en présence d'un gradient X)

et une séquence d'impulsions Y (en présence de gradients Y) irradie l'objet à des temps $3\tau/2$, 2τ et $5\tau/2$ respectivement.

Ainsi, un écho de spin X_1Y_1 est créé à un temps 3τ par les noyaux disposés en commun dans les plans 90° associés à l'impulsion Y_1 .

5 De manière analogue, les échos de spin X_1Y_2 et X_1Y_3 sont créés par les noyaux communs aux plans associés aux impulsions X_1 et Y_2 et aux impulsions X_1 et Y_3 , aux temps 4τ et 5τ respectivement.

La correction de phase non représentée peut être réalisée d'une manière analogue à celle qu'on a décrit en référence à la figure 5. Les
10 échos de spin sont enregistrés en présence d'un gradient Z et les transformées de Fourier sont exécutées pour la détermination des valeurs des densités de spins relatives normales ou modifiées par la constante T_1 .

Comme indiqué schématiquement sur la figure 7, plusieurs
15 plans Y-Z peuvent être excités séquentiellement en coopération avec un ou plusieurs plans Y-Z pour la formation d'un balayage à plusieurs lignes ou raies. Par exemple, si l'on suppose des plans Y-Z 12A, 12B et 12C (figure 4A) excités à des orientations à 90° par un processus d'irradiation sélective comprenant l'irra-
20 diation de l'objet par les impulsions successives à 90° X_1 , X_2 et X_3 en présence de gradients X et comme noté précédemment, les plans suivant l'axe X (et suivant l'axe Y) sont déterminés de façon unique par sélection des spectres convenables de fréquences pour les impulsions respectives à 90° , par décalage du champ magnétique B_0 ou par une combinaison de ces deux techniques. Après
25 excitation à 90° des plans Y-Z 12A, 12B et 12C, les plans X-Z choisis 14A et 14B sont excités à 180° par une opération similaire d'irradiation sélective à l'aide d'impulsions à 180° Y_1 et Y_2 . Les intersections des plans respectifs Y-Z et X-Z provoquent la
30 formation de plusieurs lignes d'intersection comme indiqué sur la figure 4C, X_1Y_1 , X_2Y_1 , X_3Y_1 , X_1Y_2 , X_2Y_2 et X_3Y_2 . Chaque ligne d'intersection crée un signal d'écho de spin repéré sur la figure 7 par la ligne associée d'intersection, suivant la règle précitée des temps égaux.

35 La sélection convenable des intervalles de temps entre les impulsions permet la création des échos de spin suivant une séquence ne présentant pas d'interférence. Par exemple, si l'on suppose que les impulsions à 90° X_1 , X_2 et X_3 sont créées à des

temps $0, \tau$ et 2τ respectivement et les impulsions à 180° Y_1 et Y_2 sont créées à des temps $11\tau/4$ et 3τ respectivement, l'écho de spin provenant de la ligne d'intersection X_3Y_1 est créé au temps $3\tau/2$, celui de la ligne X_3Y_2 est créé au temps 4τ , celui de la ligne X_2Y_1 est créé au temps $9\tau/2$, celui de la ligne X_2Y_2 est créé au temps 5τ , celui de la ligne X_1Y_1 est créé au temps $11\tau/2$, et celui de la ligne X_1Y_2 est créé au temps 6τ . La correction de l'étalement de phase dû aux effets des gradients respectifs est à nouveau réalisée comme décrit précédemment en référence à la figure 5. Les échos de spin sont alors enregistrés en présence d'un gradient Z et les transformées de Fourier sont effectuées pour la détermination des valeurs des densités de spins normales ou modifiées par la constante T_1 des volumes élémentaires individuels dans les lignes d'intersection. Ainsi, l'utilisation d'une séquence d'échos de spin selon l'invention permet le balayage de nombreuses lignes dans le volume 10 suivant une séquence rapide, à des fréquences qui ne sont pas limitées par le temps de relaxation spin-réseau T_1 de l'objet, comme dans les techniques de balayage mettant en oeuvre une saturation.

Dans certains cas, il est souhaitable que plusieurs lectures de l'écho de spin soient réalisées pour une ligne donnée d'intersection, afin qu'une moyenne des signaux puisse être réalisée. Comme indiqué précédemment, l'article de Mansfield et Maudsley indique que, lorsque la décroissance libre a disparu, différents arrangements de refocalisation de signaux peuvent être utilisés pour le rappel du signal en vue de la formation de la moyenne. Un processus analogue peut être utilisé pour le rappel du signal d'écho de spin. Comme indiqué sur la figure 8, un écho de spin X_1Y_1 est créé par irradiation sélective initiale d'un premier plan (volume plan) avec une impulsion X_1 à 90° puis par irradiation sélective d'un plan transversal avec une impulsion Y_1 à 180° . Si l'on suppose que l'intervalle de temps compris entre les impulsions X_1 et Y_1 est égal à τ_1 , l'écho de spin X_1Y_1 est créé avec une valeur de crête au temps τ_1 après l'irradiation de l'impulsion X_1 à 180° , suivant la règle des temps égaux. Lorsqu'une impulsion supplémentaire à 180° Y_1' , ayant un spectre de fréquences comprenant celui de l'impulsion X_1 , est créée au temps τ_2 après la valeur de crête de l'écho de spin X_1Y_1 , les phases

des spins nucléaires créant l'écho de spin X_1Y_1 sont inversées si bien que les phases convergent et provoquent la création d'une copie ou réplique X_1Y_1' de l'écho de spin X_1Y_1 .

La règle des temps égaux s'applique au phénomène de copie ou réplique. Ainsi, la réplique X_1Y_1' apparaît un temps τ_2 après la création d'une impulsion à 180° Y_1' . D'autres répliques peuvent être formées par application d'autres impulsions à 180° . Cependant, les amplitudes globales des signaux diminuent avec le temps de relaxation transversale T_2 . Cette décroissance représente une limite pratique au nombre de répliques qui peuvent être produites.

Il faut noter que, si l'impulsion Y_1' à 180° comprend des composantes spectrales qui ne sont pas contenues dans l'impulsion Y_1 , une inversion de phase est réalisée dans les parties du plan original à 90° qui ne sont pas affectées par l'impulsion Y_1 . Ainsi, ces parties du plan original à 90° forment un écho parasite de spin P à un temps $2\tau_1 + \tau_2$ après la création de l'impulsion Y_1' . L'écho parasite P peut être évité lorsque le spectre de fréquences de l'impulsion Y_1' à 180° est identique à celui de l'impulsion Y_1 .

Des répliques de plusieurs échos de spin peuvent être créées par impulsion d'une seule impulsion à 180° ayant un spectre de fréquences recouvrant les spectres individuels des impulsions originales à 180° , c'est-à-dire recouvrant les plans respectifs à 180° . Les figures 9 et 10 illustrent schématiquement une telle procédure. Sur la figure 9, un premier plan est irradié sélectivement par l'impulsion X_1 à 90° puis des plans transversaux sont irradiés sélectivement successivement par des impulsions à 180° Y_1 , Y_2 et Y_3 respectivement, appliquées à des temps $3\tau/2$, 2τ et $5\tau/2$. Ainsi, les échos de spin provenant des lignes d'intersection respectives X_1Y_1 , X_1Y_2 et X_1Y_3 sont créés aux temps 3τ , 4τ et 5τ respectivement.

L'application d'une impulsion Y' à 180° à spectre large, par exemple au temps $11\tau/2$, provoque la création de répliques des échos de spin dans l'ordre inverse. Selon la règle des temps égaux, la réplique X_1Y_3' est créée au temps 6τ ($\tau/2$ après application de l'impulsion Y' à intervalle de temps égal au temps écoulé entre l'apparition de l'écho de spin X_1Y_3 à 5τ

et l'impulsion Y'). De manière analogue, la réplique $Y_1 Y_2$ apparaît au temps 7τ et la réplique $X_1 Y_1'$ au temps 8τ .

L'application d'une seconde impulsion à $180^\circ Y''$ à spectre large par exemple au temps $17\tau/2$ provoque la création d'autres répliques des échos de spin, cette fois dans le même ordre que les échos originaux. Les répliques $X_1 Y_1''$, $X_1 Y_2''$ et $X_1 Y_3''$ respectivement apparaissent aux temps 9τ , 10τ et 11τ .

Il faut cependant noter qu'une impulsion Y' à 180° à spectre large provoque des inversions de phases dans des parties du plan à 90° qui n'ont pas subi une inversion de phases par l'impulsion Y_1 si bien qu'un écho parasite P de spin est créé en conséquence. Selon la règle des temps égaux, cet écho parasite est créé à un temps 11τ . Ainsi, l'écho parasite P rend pratiquement inutilisable la réplique $Y_3 X_1'$.

L'écho parasite peut être réduit par réduction des parties du plan à 90° qui ne subissent pas l'inversion de phase par l'impulsion Y_1 . Les effets des échos parasites peuvent aussi être réduits ou étalés entre diverses répliques par modification des synchronisations relatives des impulsions Y' et Y'' à 180° à spectre large.

La figure 10 représente une variante de séquence de balayage d'écho de spin mettant en oeuvre une telle copie ou réplique. Dans ce cas, plusieurs plans à 90° sont créés par irradiation sélective avec des impulsions à $90^\circ X_1$, X_2 et X_3 , suivies par une impulsion à $180^\circ Y_1$ ayant un spectre prédéterminé de fréquences. Les lignes résultantes d'intersection créent des échos de spin correspondants $X_3 Y_1$, $X_2 Y_1$ et $X_1 Y_1$ suivant la règle des temps égaux. Ensuite, la copie est réalisée par irradiation sélective à l'aide d'impulsions respectives à $180^\circ Y_1'$ et Y_1'' de même spectre de fréquences que l'impulsion Y_1 . Il faut noter que, comme le spectre de fréquences des impulsions à 180° est le même, aucun écho parasite n'est créé.

On se réfère maintenant aux figures 11a et 11b et 12 représentant un appareil convenant à la mise en oeuvre des séquences de balayage d'échos de spin selon l'invention. Les figures 11a et 11b représentent sous forme synoptique l'ensemble de l'appareil, alors que l'appareil utilisé pour la création des divers champs magnétiques (à l'exception du circuit de commande) est

représenté en perspective éclatée sur la figure 12.

L'objet 10 est placé dans une bobine 22 à haute fréquence disposée autour de l'axe nominal X d'un système de coordonnées cartésiennes. La bobine 22 à haute fréquence est
5 utilisée pour l'irradiation de l'objet, pour le prélèvement des signaux d'écho de spin créé par l'objet 10 et en outre, elle assure avantageusement le support de l'objet 10.

La bobine 22 est elle-même disposée entre les extrémités 24 et 26 des pièces polaires d'un aimant principal 28.
10 Celui-ci est utilisé pour la création du champ magnétique principal B_0 le long de la direction Z du système de coordonnées nominales (transversale à l'axe de la bobine 22). L'aimant 28 comprend avantageusement un noyau classique de verre autour
15 duquel sont enroulés des conducteurs de cuivre qui coopèrent avec une alimentation non représentée, et qui sont avantageusement refroidis par circulation d'eau afin que la température reste constante.

Des champs variant avec la position Z sont appliqués sélectivement par des bobines de gradient Z 34 et 36 (g_z). Ces
20 bobines 34 et 36 sont placées sur les faces respectives des extrémités des pièces polaires 24 et 26 et ont avantageusement la configuration géométrique de bobine de Maxwell. Ainsi, les bobines sont circulaires et concentriques aux extrémités des
pièces polaires, le rayon des bobines étant déterminé en fonction de la distance qui les sépare. Les bobines 34 et 36 sont
25 montées électriquement en série si bien que les champs magnétiques créés sont en opposition et s'annulent à l'origine du système de coordonnées.

Les champs magnétiques présentant un gradient de position X sont créés sélectivement par les bobines 38 et 40 créant
30 le gradient X (g_x). Les bobines 38 et 40 ont avantageusement une configuration rectangulaire et sont placées sur les bouts 24 et 26 des pièces polaires respectivement afin qu'elles simulent des conducteurs infinis placés dans la direction X. Les bobines
35 38 et 48 sont reliées électriquement afin qu'elles créent des champs magnétiques opposés qui s'annulent aussi à l'origine du système de coordonnées.

Les champs magnétiques variant avec la position Y

sont créés sélectivement par des bobines 42 et 44 au gradient Y (g_y). Les bobines 42 et 44 ont avantageusement la même configuration et la même surface que les bobines 38 et 40 de gradient X mais sont disposées sur les extrémités des pièces polaires 24 et 26 afin qu'elles simulent les conducteurs infinis disposés dans la direction Y. Les bobines 42 et 44 sont aussi reliées électriquement afin qu'elles créent des champs opposés qui s'annulent à l'origine du système de coordonnées.

Des changements du champ principal B_0 , indépendant de la position, peuvent aussi être réalisés le cas échéant par des bobines ΔB 32A et 32B disposées autour de la partie externe des bouts des pièces polaires 24 et 26 et elles sont reliées électriquement en série afin qu'elles créent un champ magnétique additif (de façon mutuelle). Le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 4 015 196 décrit plus en détail des bobines convenant à la formation de gradients magnétiques.

La bobine 22 à haute fréquence est reliée électriquement par un circuit convenable 50 d'adaptation d'impédance à une première borne d'un circuit directionnel ou circulateur 52 (circuit à raccord magique en T). Le circuit 50 d'adaptation d'impédance comprend avantageusement deux condensateurs variables destinés à assurer l'accord de la bobine 22 à haute fréquence. Les condensateurs variables sont de préférence en matière non magnétique, par exemple de cuivre ou de laiton, et sont placés avantageusement aussi près que possible de la bobine 22 à haute fréquence.

Le circuit 52 à raccord magique en T assure le couplage sélectif de la bobine 22 à haute fréquence (d'une manière s'excluant mutuellement) à un émetteur 54 et un préamplificateur 56. On sait que le circuit 52 assure la connexion de l'émetteur 54 à la bobine lorsque l'émetteur 54 est en fonctionnement, et relie la bobine 22 au préamplificateur 56 lorsque l'émetteur 54 n'est pas en cours d'émission.

Le préamplificateur 56 est avantageusement de type classique possédant un gain élevé et une grande largeur de bande. Il est souhaitable que le préamplificateur soit commuté à l'état de repos pendant les périodes d'émission ou intermédiaires afin que l'isolement par rapport à l'émetteur 54 soit excellent. Ainsi,

on peut utiliser un préamplificateur déclenché. Les signaux de sortie provenant du préamplificateur 56 sont transmis par un détecteur 62 à diodes et un filtre passe-bas 64 le cas échéant en vue du contrôle pendant l'accord du système, et ils sont
5 transmis par un circuit tampon 58 à un démodulateur 60.

Le démodulateur 60 est de préférence un démodulateur en quadrature si bien que non seulement l'information de décalage de fréquences (par rapport à la fréquence centrale comme décrit dans la suite) et la formation d'amplitudes sont transmises mais
10 le signe de décalage de fréquences peut aussi être déterminé et permet la détermination des composantes de fréquences par rapport aux positions dans l'objet 10, de part et d'autre de l'origine. En outre, l'utilisation d'un démodulateur en quadrature évite les erreurs de phase dues aux retards des circuits. Le démodulateur 60 peut recevoir des signaux représentatifs du signal émis
15 (ainsi que du signal reçu) et il crée des signaux de sortie en phase I et en quadrature Q (le signal de sortie Q est déphasé de 90° par rapport au signal de sortie I). Ces signaux I et Q comprennent des composantes représentatives de la somme et de la
20 différence de la fréquence du signal reçu et de la fréquence du signal émis. Le signal d'écho de spin (moins la fréquence porteuse) est restitué par détermination de la racine carrée de la somme des carrés des signaux I et Q. On décrit plus en détail un démodulateur convenable 60 en référence à la figure 13.

Les signaux de sortie I et Q du démodulateur sont
25 transmis par des filtres passe-bas correspondants 68 à un convertisseur analogique-numérique 70 à deux canaux. Ce convertisseur est lui-même relié par un circuit 72 de couplage à une mémoire à accès direct, à un calculateur convenable 96.

L'émetteur 54 est avantageusement un amplificateur de classe A ayant une largeur de bande qui suffit pour couvrir la largeur de bande voulue des fréquences de Larmor, et il est piloté par des signaux provenant d'un modulateur 74. Celui-ci est avantageusement un mélangeur équilibré (avec filtrage) et
30 il reçoit un signal de réglage de forme d'impulsion d'une commande convenable 76 à micro-ordinateur (comme décrit dans la suite) et un signal à une fréquence porteuse voulue de Larmor (fréquence centrale).
35

Le signal de fréquence porteuse de Larmor est avantageusement créé à partir du signal de sortie d'un oscillateur piézoélectrique 78, par un circuit 80 générateur de déphasage et synthétiseur de fréquence, verrouillés en phase par rapport à l'oscillateur 78 et un circuit convenable 84 formant filtre passe-bande et circuit de réglage de niveau. Ce filtre 84 crée une onde sinusoïdale ayant une enveloppe prédéterminée constante à partir du signal de sortie du synthétiseur 80 de fréquence. On décrit plus en détail dans la suite en référence à la figure 13 un générateur de déphasage et synthétiseur de fréquence 80. La création du signal à la fréquence centrale de Larmor est réalisée en fonction des signaux de commande provenant de la commande 76 à micro-ordinateur.

La commande 76 règle essentiellement la séquence d'événements dans toute l'installation de résonance magnétique nucléaire : le couplage d'un ordinateur 96 avec l'installation, l'affichage des données par exemple avec un terminal 100 à tube à rayons cathodiques, la création des gradients de champ ainsi que la synchronisation, l'amplitude, la fréquence et la phase des signaux électromagnétiques émis. La commande 76 est avantageusement à base d'un micro-ordinateur tel que LSI-11. Un tel micro-ordinateur peut être modifié afin qu'il ait un fonctionnement plus rapide (par exemple par rapport à la commutation du signal de porteuse, à la sélection de direction du gradient et à la sélection de la phase) par addition de circuits câblés de couplage d'application particulière, comme décrit dans l'article de "An NMR Sequencer for Imaging", de J. Hoeningner et L. Crooks, actuellement sous presse.

Lors de la création des gradients de champ magnétique, la commande 76 crée des signaux de commande représentatifs des valeurs voulues pour les gradients et pour les sens particuliers des gradients. Un signal de commande analogue représentatif des valeurs particulières de ΔB et/ou Δf est créé le cas échéant. Les signaux de réglage de valeurs de gradients et/ou le signal ΔB sont appliqués à des circuits classiques 90 formant convertisseurs tension-courant et amplificateurs qui eux-mêmes appliquent les signaux de gradients aux bobines convenables g_z 34, 36, g_x 38, 40, et g_y 42 et 44, les signaux ΔB étant transmis aux

bobines 32A et 32B.

La commande 76 transmet des signaux de commande représentatifs de la forme voulue pour l'impulsion à haute fréquence, au modulateur 74 afin que l'amplitude et durée des signaux électromagnétiques soient ainsi réglées, et ainsi l'angle de réorientation du spin (nutation) soit 90 ou 180°, réalisé par le signal. La configuration de l'impulsion électromagnétique et le facteur d'échelle de l'amplitude, ayant les valeurs voulues, sont conservés en mémoire et utilisés sélectivement pour la création des signaux de commande.

Au cours de l'opération d'irradiation sélective, il est souhaitable que les impulsions électromagnétiques aient un spectre à bande étroite de fréquences. Ainsi, on utilise une configuration d'impulsion $(\sin t)/t$ (donnant un spectre de fréquences presque rectangulaire). On considère aussi l'utilisation d'une impulsion de forme gaussienne (donnant un spectre gaussien de fréquences).

La commande 76 permet aussi le réglage et l'échantillonnage par le convertisseur analogique-numérique 70 et la commande de la transmission des données au calculateur 96 par le circuit 72 de couplage. Sous la commande des signaux provenant de la commande 76, le convertisseur 70 prélève un nombre prédéterminé d'échantillons de signaux démodulés et transmet les données au calculateur principal 96 (la mémoire 98) par l'intermédiaire du circuit 72. Lorsqu'un groupe d'échantillons est reçu par le calculateur principal 96, il est conservé à des emplacements convenables de la mémoire 98. La programmation de la commande 76 à micro-ordinateur et du calculateur principal 96 est coordonnée de manière que les données reçues à partir du circuit 72 puissent être convenablement interprétées par rapport à la séquence. Ensuite, une transformation de Fourier des données est réalisée, et la transformée de Fourier des balayages respectifs de ligne est affichée sur le dispositif 101 d'affichage à tubes à rayons cathodiques. Le cas échéant, des servo-mécanismes de positionnement de l'échantillon (objet 10) par rapport aux diverses bobines peuvent aussi être commandés.

On se réfère maintenant à la figure 13 pour la description détaillée d'un circuit démodulateur en quadrature con-

venable 60 et d'un circuit convenable 80 générateur de déphasage et synthétiseur de fréquence. Ce circuit 80 et le démodulateur 60, afin qu'ils réduisent au minimum les fuites, fonctionnent avantageusement essentiellement à des fréquences intermédiaires autres que la fréquence réellement émise par l'émetteur 54 et reçue par le préamplificateur 56. A cet égard, on peut se référer au brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 3 651 396. Ainsi, l'oscillateur piézoélectrique 78 transmet un signal de sortie de forme rectangulaire, ayant une fréquence prédéterminée (10 MHz) au circuit 80. Dans l'hypothèse où la fréquence voulue de Larmor est de l'ordre de 15 MHz, le signal de l'oscillateur à 10 MHz est alors transmis convenablement à un circuit 102 diviseur de fréquence (par un facteur 5) afin qu'un signal à 2 MHz soit formé. Ce signal est appliqué convenablement à un circuit 104 synthétiseur de fréquence qui est programmable et à une boucle 106 à verrouillage de phase. Le synthétiseur programmable 104 peut recevoir des signaux de commande indiquant la fréquence voulue à la sortie, provenant de la commande 76. Le signal de sortie du synthétiseur 104 est transmis par une porte 108, d'après les signaux de la commande 76 et du filtre passe-bas 110, vers un mélangeur équilibré classique 112.

La boucle 106 à verrouillage de phase comprend avantageusement un oscillateur commandé en tension fonctionnant autour d'une fréquence centrale prédéterminée telle que 52 MHz, et verrouillée en phase sur le signal à 2 MHz. Le signal de sortie à 52 MHz de la boucle 106 verrouillée en phase est convenablement transmis à un générateur classique 116 de quatre signaux déphasés, créant des signaux à la fréquence intermédiaire de 13 MHz, avec des phases de 0, 90, 180 et 270°. Les signaux de sortie du générateur 116 sont transmis à un circuit sélecteur 118 à porte commandé par les signaux de la commande 76. Le signal choisi à la fréquence intermédiaire est transmis par un filtre passe-bas 120 au mélangeur 112 qui crée une composante d'un signal différent à la fréquence voulue de la porteuse de Larmor.

Si l'on suppose que la fréquence voulue est de 15 MHz, le synthétiseur programmable 104 est réglé par la commande 76 afin qu'il transmette un signal à 28 MHz si bien que la composante obtenue par différence, formée par le modulateur 112 (28 - 13 MHz)

correspond à la fréquence voulue de 15 MHz. Cette composante différence est extraite par le circuit 84 formant filtre passe-bande et le circuit de réglage de niveau afin qu'une onde sinusoïdale d'enveloppe constante soit formée à la fréquence voulue de la porteuse de Larmor.

Le signal de sortie du synthétiseur 104 est aussi transmis à un amplificateur tampon 122 incorporé au démodulateur 60. Le signal traité est transmis par une porte 124, à un mélangeur équilibré 126 en fonction des signaux de la commande 76. Ce mélangeur 126 peut recevoir aussi le signal reçu et amplifié par le préamplificateur 56 et le circuit tampon 58. Dans l'exemple pour lequel la fréquence porteuse émise est de 15 MHz et le signal de sortie du synthétiseur est à 28 MHz, la composante différence du signal de sortie du mélangeur 126 est à la fréquence intermédiaire de 13 MHz. La composante différence est extraite du signal de sortie du mélangeur par un filtre passe-bas 128 et parvient à un amplificateur convenable 130 à fréquence intermédiaire, accordé à 13 MHz. Les signaux de sortie de l'amplificateur 130 parviennent à des mélangeurs équilibrés 132 et 134. Ceux-ci peuvent recevoir les signaux intermédiaires ayant les phases 0 et 90° provenant du générateur 116 de déphasage incorporé au circuit 80. Ainsi, les mélangeurs 132 et 134 transmettent des signaux à la fréquence acoustique en phase et en quadrature, représentatifs des composantes respectives d'aimantation du signal d'écho de spin.

Comme indiqué précédemment, les signaux de sortie I et Q sont filtrés et échantillonnés puis conservés dans la mémoire 98 du calculateur 96. Celui-ci calcule en fait la somme vectorielle des composantes I et Q et effectue une transformation de Fourier sur la somme vectorielle afin qu'il crée des valeurs correspondant aux amplitudes des composantes respectives des fréquences des signaux des échos de spin.

Il faut noter que, comme le démodulateur 60 et le circuit 80 générateur de déphasage et synthétiseur de fréquence fonctionnent essentiellement à des fréquences intermédiaires autres que la fréquence porteuse de Larmor, les fuites de l'émetteur dans le démodulateur 60 sont notablement réduites.

Par exemple, on considère le fonctionnement de l'appar-

reil des figures 11a, 11b, 12 & 13 pendant un balayage d'une seule ligne. Les séquences particulières voulues d'irradiation sélective sont introduites (ou rappelées depuis la mémoire) et la séquence est déclenchée après un signal de préparation provenant du calculateur principal 87 et destiné à la commande 76. L'aimant principal 28 est commandé afin que les spins nucléaires soient alignés initialement.

La commande 76 calcule ou rappelle dans la mémoire ou dans une table de consultation, la configuration d'impulsions, les amplitudes et durées nécessaires aux nutations de spin de 90° et 180°, les intervalles de temps voulus entre les impulsions et les valeurs voulues pour les gradients.

Les signaux convenables de commande sont créés afin qu'un volume particulier soit irradié sélectivement par une impulsion à 90° (plan Y-Z 12 de la figure 10). Un signal convenable est appliqué aux bobines g_x 38 et 40 afin qu'un gradient X soit formé dans l'objet 10. Un signal sous forme d'une impulsion à haute fréquence d'amplitude et durée convenant à l'angle voulu de rotation (c'est-à-dire 90°) est créé et appliqué au modulateur 74.

Simultanément, des signaux convenables de commande sont transmis au circuit 80 générateur de déphasage et synthétiseur de fréquence afin qu'un signal de porteuse soit formé à la fréquence de Larmor associée au plan 12. Le synthétiseur programmable 104 de fréquence (figure 13) est chargé par un code convenable de fréquence provenant de la commande 76 à micro-ordinateur, et le mode de création de signaux commence.

Il est parfois souhaitable, pour la formation de la moyenne des signaux, que les spins subissent une nutation sélective de l'angle choisi (90, 180°) dans des directions différentes (par exemple que les rotations des spins soient réalisées vers les axes Y ou -Y ou les axes X ou -X). Ainsi, la commande 76 crée aussi un signal convenable de commande transmis à la porte 118 de sélection du circuit 80 générateur et synthétiseur (figure 13) afin que le signal à fréquence intermédiaire de phase convenable soit transmis au mélangeur 112, le signal de la porteuse ayant une phase telle que l'impulsion électromagnétique émise assure la rotation dans le sens voulu. La porteuse 108

(figure 13) est alors fermée afin que le signal à la fréquence de la porteuse soit appliqué au modulateur 74.

Le modulateur 74 transmet donc une impulsion conformée à haute fréquence, à la fréquence voulue de Larmor (avec la phase voulue) à l'émetteur 54. Celui-ci crée en conséquence un signal par l'intermédiaire du circuit 52, du commutateur 53 à haute fréquence et du circuit d'adaptation 50 de 50 ohms, vers la bobine 22 à haute fréquence, et l'objet 10 est ainsi irradié. Ainsi, un plan Y-Z 12 dans l'objet 10 est excité à 90° par une opération d'irradiation sélective.

La commande 76 crée alors des signaux convenables de réglage de gradient de polarité opposée pendant une période prédéterminée, afin qu'un gradient négatif soit créé et permette la correction de la phase, le signal de gradient étant alors supprimé des bobines g_x 38, 40 si bien que le gradient X est supprimé.

Un signal convenable est appliqué aux bobines g_z 34 et 36 afin qu'un gradient Z soit formé dans l'objet 10. Après un temps prédéterminé, ces signaux sont supprimés, si bien que le gradient Z disparaît. La synchronisation des événements peut être modifiée afin que le gradient Z soit appliqué pendant un temps qui recouvre celui pendant lequel le gradient X utilisé pour la correction de phase est appliqué.

Des signaux convenables de commande sont alors créés afin qu'ils assurent l'irradiation sélective du plan X-Z 14 (figure 1C) par une impulsion à 180° . Un signal sous forme d'une impulsion à haute fréquence, ayant l'amplitude et la durée correspondant à un angle de rotation de 180° , est appliqué au modulateur 74 et les signaux convenables de commande sont transmis au synthétiseur 104 et au sélecteur 116 de déphasage afin que la fréquence et la phase du signal de porteuse soient déterminées. La porte 108 est préparée et le signal modulé (impulsion à 180°) est transmis à la bobine afin que le plan 14 soit irradié sélectivement. Simultanément, un signal convenable est transmis aux bobines g_y 42 et 44 afin qu'un gradient Y soit formé dans l'objet 10. Après l'écoulement du temps approprié, l'émetteur est arrêté et le gradient est supprimé, par l'intermédiaire de la porte 103, suivant le signal donnant la valeur du gradient

transmis par la commande 76.

Après une période correspondant à la règle des temps égaux, la ligne d'intersection 16 (figure 1D) des plans transversaux (12 et 14) provoque la création d'un écho de spin. Juste avant la création prévue de l'écho de spin, des signaux convenables de commande sont utilisés pour la transmission du signal correspondant à la valeur du gradient aux bobines g_z 34 et 36 si bien qu'un gradient Z est formé dans l'objet 10. La porte 124 est préparée afin qu'elle provoque la mise en fonctionnement du démodulateur.

Les signaux d'écho de spin sont induits dans la bobine 22 et sont transmis par le circuit 52 au préamplificateur 56 puis à un circuit tampon 58 vers le démodulateur 60 en quadrature. Ce dernier, en coopération avec le filtre passe-bas 68, crée un signal à fréquence acoustique qui est échantillonné sélectivement à une fréquence prédéterminée par le convertisseur analogique-numérique 70 en fonction de signaux provenant de la commande 76. Les échantillons numérisés sont alors chargés dans la mémoire 98 par l'intermédiaire du circuit 72 de couplage et du calculateur 96.

La séquence se répète un nombre prédéterminé de fois et la moyenne convenable des signaux est réalisée dans le calculateur 96. Ce dernier assure aussi le calcul des transformées de Fourier et les résultats sont présentés sur le dispositif 101 d'affichage à tube à rayons cathodiques.

Lorsqu'un balayage à plusieurs lignes doit être réalisé, les irradiations sélectives successives de plans parallèles sont réalisées soit par modification de la fréquence porteuse, par chargement convenable du synthétiseur programmable 104 avec la fréquence de Larmor $+\Delta f$, soit par changement approprié du champ magnétique de base par application de signaux convenables ΔB aux bobines B 32A et 32B, soit par ces deux opérations.

Il faut noter que l'appareil décrit est un exemple de différents types d'appareils qui peuvent être utilisés pour la mise en oeuvre des séquences de balayages de signaux d'écho de spin selon l'invention. Il faut noter que d'autres appareils conviennent aussi. Par exemple, l'appareil décrit dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 4 021 726 peut être adapté à la

mise en oeuvre d'une séquence de balayage de signaux d'écho de spin. En outre, il faut noter que, bien que les divers conducteurs représentés entre les différents éléments des figures 11a, 11b, 12 et 13 soient représentés par des lignes uniques, il ne s'agit pas d'une caractéristique limitative, chaque trait pouvant présenter plusieurs connexions, de manière bien connue dans la technique.

Il est bien entendu que l'invention n'a été décrite et représentée qu'à titre d'exemple préférentiel et qu'on pourra apporter toute équivalence technique dans ses éléments constitutifs sans pour autant sortir de son cadre.

REVENDICATIONS

1. Procédé de détermination des densités relatives des noyaux dans un objet, les noyaux ayant des spins nucléaires aux fréquences de Larmor qui dépendent de l'intensité d'un champ magnétique appliquée, le dit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend la création sélective de signaux d'écho de spin provenant de noyaux disposés dans un volume prédéterminé de l'objet, et la détection de l'intensité des signaux d'écho de spin afin qu'une mesure de la densité normale ou de la densité modifiée par la constante de temps T_1 des noyaux dans le volume prédéterminé soit obtenue.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la création sélective des signaux d'écho de spin par les noyaux placés dans un volume prédéterminé comprend l'excitation sélective d'un premier volume étalé ou plan contenant le volume prédéterminé afin que les spins nucléaires des noyaux contenus dans ce premier volume plan subissent une nutation d'environ 90° , et l'excitation sélective d'un second volume plan, transversal au premier, un intervalle prédéterminé de temps après, le volume prédéterminé se trouvant à l'intersection du premier et du second volume plan, afin que les spins nucléaires des noyaux contenus dans le second volume plan subissent une nutation de 180° , si bien que les noyaux qui se trouvent à l'intersection créent ensuite des signaux d'écho de spin à des moments qui dépendent de l'intervalle prédéterminé de temps.
3. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que la détection de l'intensité des signaux d'écho de spin comprend la réception de ces signaux, la création d'un champ magnétique dans le volume prédéterminé, avec une intensité qui varie en fonction de la position, pendant la réception des signaux d'écho de spin, et la création de valeurs représentant les intensités relatives des composantes à des fréquences différentes, présentes dans les signaux d'écho de spin.
4. Appareil destiné à donner des valeurs relatives aux densités nucléaires relatives normales ou modifiées par la constante de temps T_1 , des noyaux qui se trouvent dans un objet, ces noyaux ayant des spins nucléaires ayant des fréquences de Larmor correspondant à l'intensité du champ magnétique appliqué, le dit

appareil étant caractérisé en ce qu'il comprend un dispositif d'alignement initial des spins nucléaires des noyaux, un dispositif d'excitation sélective successive des noyaux disposés dans un nombre prédéterminé de premiers volumes sensiblement plans et parallèles qui se trouvent dans l'objet afin que les spins nucléaires des noyaux qui se trouvent dans les premiers volumes sensiblement plans soient réorientés d'un premier angle prédéterminé, un dispositif d'excitation sélective et successive des noyaux qui se trouvent dans ce nombre prédéterminé de seconds volumes sensiblement plans transversaux aux premiers volumes sensiblement plans et recoupant ces premiers volumes sensiblement plans à l'intérieur de l'objet afin que les spins nucléaires des noyaux soient réorientés d'un second angle prédéterminé dans les seconds volumes sensiblement plans, si bien que les spins nucléaires des noyaux qui se trouvent aux intersections respectives des premiers et seconds volumes créent des signaux respectifs d'écho de spin pendant des périodes successives de temps, et un dispositif destiné à recevoir les signaux d'écho de spin et à déterminer à partir de ceux-ci la densité normale ou modifiée par la constante T_1 des noyaux qui se trouvent aux intersections respectives.

5. Appareil selon la revendication 4, caractérisé en ce que le dispositif de réception des signaux d'écho de spin respectifs et de détermination de la densité normale ou modifiée par la constante de temps T_1 des noyaux aux intersections respectives, comprend un dispositif destiné à créer, pendant les périodes successives respectives de temps, des champs magnétiques d'intensité variant avec la position dans les intersections respectives, et un dispositif destiné à former la transformée de Fourier des signaux d'écho de spin.

6. Procédé de détermination des densités nucléaires relatives normales ou modifiées par la constante de temps T_1 , à l'intérieur d'un objet comprenant des noyaux ayant des spins nucléaires à des fréquences de Larmor correspondant à l'intensité du champ magnétique appliqué, le procédé étant du type qui comprend la création d'une séquence de champs magnétiques variant avec la position afin que l'intensité des champs magnétiques varie successivement dans l'objet en fonction de la posi-

tion dans des directions transversales, l'irradiation de l'objet avec une séquence de signaux ayant des spectres prédéterminés de fréquences, en présence de champs associés variant avec la position, afin que les spins nucléaires des noyaux ayant des fréquences de Larmor comprises dans lesdits spectres de fréquences soient réorientés sélectivement, et la détection des signaux créés par les noyaux, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend la création d'une séquence supplémentaire de champs magnétiques variant avec la position, chaque champ successif étant créé après un premier champ magnétique correspondant variant avec la position, et la variation de l'intensité du champ magnétique dans l'objet dans une direction convenable par rapport à la direction du premier champ correspondant variant avec la position afin que l'étalement parasite des phases dans l'objet dû au premier champ correspondant soit corrigé.

7. Procédé de détermination des densités nucléaires normales ou modifiées par la constante T_1 , dans un objet, les noyaux ayant des spins nucléaires à des fréquences de Larmor dépendant de l'intensité du champ magnétique appliqué, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend :

la disposition de l'objet dans un premier champ magnétique intense afin que les spins nucléaires des noyaux soient alignés sur une première direction prédéterminée,

la création, pendant une première période prédéterminée, d'un premier champ magnétique variant avec la position afin que l'intensité du champ magnétique varie dans l'objet en fonction de la position suivant une seconde direction prédéterminée si bien que les fréquences de Larmor des noyaux varient en fonction de la position relative suivant la seconde position prédéterminée,

l'irradiation de l'objet pendant la première période prédéterminée avec un signal ayant un spectre de fréquences comprenant sensiblement des composantes correspondant à une bande prédéterminée de fréquences nucléaires de Larmor, afin que les noyaux ayant des fréquences de Larmor comprises dans cette bande prédéterminée soient excités, les spins nucléaires des noyaux se trouvant dans un premier plan prédéterminé dans l'objet étant réorientés d'un premier angle prédéterminé par rapport à leur orientation,

la création, pendant des secondes périodes prédéterminées suivant la première période, d'un second champ magnétique variant avec la position afin que le champ magnétique varie dans l'objet suivant la position le long d'une troisième direction prédéterminée, si bien que les fréquences de Larmor des noyaux se trouvant dans l'objet varient en fonction de la position relative des noyaux suivant la troisième direction prédéterminée, cette troisième direction étant transversale par rapport à la seconde,

l'irradiation de l'objet pendant les secondes périodes prédéterminées, à l'aide de signaux ayant des spectres de fréquences comprenant sensiblement des composantes correspondant aux bandes prédéterminées de fréquences de Larmor afin que les spins nucléaires des noyaux qui se trouvent dans les plans supplémentaires respectifs se réorientent d'un second angle prédéterminé par rapport à la première orientation, ces plans supplémentaires ne se recoupant pas mutuellement et recoupant chacun le premier plan dans l'objet suivant des lignes uniques d'intersections, des signaux d'écho de spin étant ensuite créés pendant des troisièmes périodes respectives,

la création, pendant les troisièmes périodes respectives, de champs magnétiques supplémentaires variant avec la position afin que l'intensité du champ magnétique varie dans l'objet en fonction de la position suivant les lignes d'intersections, si bien que les fréquences de Larmor des noyaux se trouvant le long des lignes d'intersections varient en fonction de la position relative le long des lignes d'intersections, et

la détection des signaux d'écho de spin et la détermination de l'intensité relative des composantes de fréquences de ces signaux, chaque composante de fréquences des signaux d'écho de spin étant représentative de la densité de spin normale ou modifiée par la constante de temps T_1 des noyaux occupant une position associée le long des lignes d'intersections.

8. Procédé de détermination des densités relatives normales ou modifiées par la constante de temps T_1 de noyaux placés dans un objet, les noyaux ayant des spins nucléaires à des fréquences de Larmor qui dépendent de l'intensité du champ magnétique appliqué, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il

comprend :

la disposition de l'objet dans un premier champ magnétique intense afin que les spins nucléaires des noyaux soient alignés suivant une première direction prédéterminée,

5 la création, pour une première période prédéterminée, d'un premier champ magnétique variant avec la position afin que l'intensité du champ magnétique varie dans l'objet suivant la position le long d'une seconde direction prédéterminée, les fréquences de Larmor des noyaux variant en fonction de la position relative le long de la seconde direction prédéterminée,

10 l'irradiation de l'objet pendant la première période prédéterminée avec un signal ayant un spectre de fréquences comprenant sensiblement des composantes correspondant à une bande prédéterminée de fréquences nucléaires de Larmor, afin que des noyaux ayant des fréquences de Larmor dans la bande prédéterminée soient excités sélectivement, les spins nucléaires des noyaux disposés dans le premier plan prédéterminé dans l'objet étant réorientés d'un premier angle prédéterminé par rapport à leur orientation,

20 la création, pendant des secondes périodes prédéterminées successives, postérieures à la première période, d'un second champ magnétique variant avec la position afin que le champ magnétique varie dans l'objet en fonction de la position le long d'une troisième direction prédéterminée, les fréquences de Larmor des noyaux de l'objet variant en fonction de la position relative des noyaux le long de la troisième direction prédéterminée, cette troisième direction prédéterminée étant transversale par rapport à la seconde direction prédéterminée,

25 l'irradiation de l'objet pendant les secondes périodes prédéterminées successives avec des signaux ayant un spectre de fréquences comprenant sensiblement des composantes correspondant à une bande prédéterminée de fréquences de Larmor afin que les spins nucléaires des noyaux ayant des fréquences de Larmor comprises dans la bande prédéterminée de fréquences de Larmor se réorientent d'un second angle prédéterminé par rapport à leur première orientation,

30 la modification cumulée de l'intensité du premier champ magnétique d'une quantité prédéterminée dans chaque

seconde période prédéterminée afin que les noyaux particuliers ayant des fréquences de Larmor comprises dans la bande prédéterminée de fréquences de Larmor soient modifiés pendant chaque seconde période prédéterminée, si bien que les spins nucléaires, dans des plans supplémentaires à l'intérieur de l'objet se réorientent du second angle prédéterminé, les plans supplémentaires recoupant le premier plan suivant des lignes uniques d'intersection, les noyaux placés autour des lignes d'intersections créant des signaux d'écho de spin ultérieurement pendant des troisièmes périodes successives,

la création, pendant les troisièmes périodes, de champs magnétiques supplémentaires variant avec la position afin que l'intensité du champ magnétique varie dans l'objet suivant la position le long des lignes d'intersections, si bien que les fréquences de Larmor des noyaux se trouvant le long des lignes d'intersections varient avec la position relative le long de la ligne d'intersections, et

la détection des signaux d'écho de spin et la détermination de l'intensité relative des composantes de fréquences de ces signaux, chacune des composantes de fréquences des signaux d'écho de spin étant représentative de la densité normale ou modifiée par la constante de temps T_1 des noyaux occupant une position associée le long de la ligne d'intersections créant l'écho de spin.

9. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'il comprend :

la création, pendant des quatrièmes périodes suivant les troisièmes périodes, d'un quatrième champ magnétique variant avec la position afin que l'intensité du champ magnétique variant dans l'objet suivant la position le long de la troisième direction prédéterminée,

l'irradiation de l'objet pendant une partie au moins de la quatrième période prédéterminée avec un troisième signal ayant un spectre de fréquences qui comprend toutes les fréquences des irradiations des secondes périodes afin que des signaux de réplique des signaux d'écho de spin soient créés ultérieurement, pendant des cinquièmes périodes prédéterminées respectives,

la création, pendant les cinquièmes périodes prédétermi-

minées, d'un quatrième champ magnétique variant avec la position afin que l'intensité du champ magnétique varie dans l'objet suivant la position le long de la ligne d'intersection, la détection des répliques, et

5 le traitement des signaux d'écho de spin et des répliques en combinaison afin que le signal traité obtenu soit représentatif de la densité des noyaux.

10. Appareil destiné à donner des valeurs correspondant aux densités nucléaires relatives dans des volumes élémentaires d'un objet, les noyaux ayant des spins nucléaires à des fréquences de Larmor dépendant de l'intensité du champ magnétique appliqué, ledit appareil étant caractérisé en ce qu'il comprend :

15 un dispositif commandé par des signaux de commande qu'il reçoit et destiné à créer un premier champ magnétique intense dans l'objet, afin que les spins des noyaux s'alignent dans une première direction prédéterminée,

20 un premier dispositif générateur, pendant une première période prédéterminée, d'un premier champ magnétique variant avec la position, faisant varier l'intensité du champ magnétique dans l'objet en fonction de la position dans la seconde direction prédéterminée si bien que les fréquences de Larmor des spins nucléaires varient en fonction des positions relatives des noyaux suivant la seconde direction prédéterminée,

25 un second dispositif d'irradiation de l'objet pendant la première période prédéterminée avec un signal ayant un spectre de fréquences comprenant sensiblement des composantes correspondant à une bande prédéterminée de fréquences de Larmor afin que les noyaux ayant des fréquences de Larmor comprises dans cette bande prédéterminée soient excités sélectivement, les spins des noyaux se trouvant dans un premier plan prédéterminé dans l'objet se réorientant d'un premier angle prédéterminé par rapport à leur orientation,

30 un troisième dispositif générateur, pendant des secondes périodes prédéterminées séquentielles respectives suivant la première période, d'un second champ magnétique variant avec la position, faisant varier le champ magnétique dans l'objet d'après la position suivant une troisième direction prédéterminée si bien que les fréquences de Larmor des noyaux présents dans l'objet

varient en fonction de la position relative des noyaux dans la troisième direction prédéterminée, cette troisième direction étant transversale par rapport à la seconde,

un quatrième dispositif destiné à irradier l'objet
 5 pendant les secondes périodes prédéterminées successives avec des signaux ayant un spectre de fréquences qui comprend essentiellement les composantes de fréquences correspondant à une bande prédéterminée de fréquences de Larmor afin que les spins des noyaux ayant des fréquences de Larmor comprises dans cette bande
 10 prédéterminée soient réorientés d'un second angle prédéterminé par rapport à leur première orientation,

un cinquième dispositif générateur de signaux de commande destiné au premier dispositif et destiné à faire varier sélectivement l'intensité du premier champ magnétique, par des
 15 quantités prédéterminées, pendant chaque seconde période prédéterminée afin que les noyaux particuliers ayant des fréquences de Larmor dans la bande prédéterminée soient changés pendant chaque seconde période prédéterminée, des plans supplémentaires de l'objet étant ainsi réorientés du second angle prédéterminé,
 20 ces plans supplémentaires recoupant le premier plan suivant des lignes uniques d'intersection, les noyaux placés le long des lignes d'intersection créant ensuite des signaux d'écho de spin pendant des troisièmes périodes successives respectives,

un sixième dispositif générateur, pendant les troi-
 25 sièmes périodes respectives, de champs magnétiques supplémentaires variant avec la position, faisant varier l'intensité du champ magnétique dans l'objet suivant la position le long des lignes d'intersection si bien que les fréquences de Larmor des noyaux se trouvant le long de ces lignes d'intersection
 30 varient en fonction de la position relative le long de la ligne d'intersection,

un septième dispositif destiné à détecter les signaux d'écho de spin et à déterminer les intensités relatives des composantes de fréquences de ces signaux, chacune des composantes
 35 de fréquences des signaux d'écho de spin étant représentative de la densité des atomes occupant une position associée le long de la ligne d'intersection créant l'écho de spin, et

un huitième dispositif coopérant avec le premier, le

troisième et le cinquième dispositif et destiné à faire varier sélectivement l'intensité du champ magnétique dans l'objet suivant la position le long de la seconde et de la troisième direction et le long des lignes d'intersection, pendant
 5 diverses périodes prédéterminées afin que l'étalement parasite de la phase des signaux de spin soit corrigé.

11. Appareil de détermination des densités nucléaires relatives dans des volumes élémentaires d'un objet, les noyaux ayant des spins nucléaires à des fréquences de Larmor dépendant
 10 de l'intensité du champ magnétique appliqué, les noyaux étant sensibles uniquement à des signaux à leur fréquence de Larmor, l'objet étant considéré par rapport à un système nominal de coordonnées cartésiennes ayant des directions orthogonales X, Y et Z, ledit appareil étant caractérisé en ce qu'il comprend :
- 15 un premier dispositif commandé par des signaux de commande qui lui sont appliqués et destiné à créer de façon réglée un champ magnétique indépendant de la position, dans l'objet et le long de la direction Z,
- 20 un second dispositif commandé par des signaux de commande qui lui sont appliqués et destiné à créer de façon réglée des champs magnétiques respectifs variant avec la position, dans l'objet, si bien que l'intensité du champ magnétique dans la direction Z, dans l'objet, varie en fonction de la position X, Y et Z respectivement, avec variation des fréquences de Larmor
 25 des spins nucléaires dans l'objet en fonction des positions X, Y et Z respectivement,
- un troisième dispositif commandé par des signaux de commande qu'il reçoit et destiné à créer un signal de porteuse à une fréquence prédéterminée de porteuse,
- 30 un quatrième dispositif commandé par des signaux de commande qu'il reçoit et destiné à créer de façon réglée un signal de modulation ayant une forme d'onde, une amplitude et une durée prédéterminées et choisies,
- 35 un cinquième dispositif commandé par le signal de modulation et le signal de porteuse et destiné à moduler ce dernier par le signal de modulation et à irradier l'objet avec le signal modulé,
- un sixième dispositif destiné à créer un premier jeu

de signaux de commande destinés au second, au troisième et au quatrième dispositif afin que, pendant un nombre prédéterminé de premières périodes successives, un champ variant avec la position X soit créé et irradie l'objet par des premiers signaux

5 ayant une première amplitude et une première durée prédéterminées, et ayant des spectres prédéterminés de fréquences correspondant à des plages particulières de fréquences de Larmor si bien que des spins nucléaires, dans les plans respectifs Y-Z de l'objet, se réorientent de 90° environ, ce sixième dispositif

10 étant aussi destiné à créer un second jeu de signaux de commande destiné au second, au troisième et au quatrième dispositif et destiné à provoquer, pendant un nombre prédéterminé de secondes périodes successives suivant les premières périodes, la création d'un champ magnétique variant avec la position Y, et l'irradia-

15 tion de l'objet par des seconds signaux ayant une seconde amplitude et une seconde durée prédéterminées et ayant des spectres de fréquences correspondant à des plages particulières de fréquences de Larmor si bien que les spins nucléaires compris dans des plans X-Z respectifs se réorientent de 180° environ, les plans

20 respectifs X-Z recoupant les plans respectifs Y-Z le long de lignes uniques respectives d'intersection dans l'objet, l'intersection provoquant ultérieurement la création de signaux d'écho de spin, ce sixième dispositif étant aussi destiné à créer un troisième jeu de signaux de commande destiné au second dispositif

25 et à créer des gradients Z respectifs à des moments dépendant des intervalles de temps entre les irradiations de l'objet par les premiers et les seconds signaux si bien que des signaux d'écho de spin sont créés en présence des gradients Z,

un septième dispositif destiné à recevoir les signaux

30 d'écho de spin et à créer des signaux représentatifs correspondants,

un démodulateur en quadrature, commandé par les signaux représentatifs des signaux d'écho de spin et des signaux respectifs en phase et en quadrature représentatifs du signal de porteuse, et destiné à créer des signaux respectifs de sortie représentatifs des différences de phases et de fréquences entre les signaux d'écho de spin et le signal en phase, et les signaux d'écho de spin et le signal en quadrature,

35

un dispositif de calcul des sommes vectorielles des signaux de sortie du démodulateur en quadrature,

un dispositif de calcul des transformées de Fourier des sommes vectorielles, destiné à former des valeurs correspondant aux composantes de fréquences, et

un huitième dispositif destiné à transmettre des signaux de commande au second dispositif afin que les champs magnétiques variant avec la position soient appliqués à l'objet pendant diverses périodes prédéterminées, de manière que l'étalement parasite des phases des signaux de spin soit corrigé.