

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la  
Propriété Intellectuelle  
Bureau international



WIPO | PCT



(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2013/017777 A1**

(43) Date de la publication internationale  
7 février 2013 (07.02.2013)

(51) Classification internationale des brevets :  
G01R 33/385 (2006.01) G01R 33/3875 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2012/051756

(22) Date de dépôt international :  
24 juillet 2012 (24.07.2012)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
1157029 1 août 2011 (01.08.2011) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : COM-  
MISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX  
ENERGIES ALTERNATIVES [FR/FR]; Bâtiment "Le  
Ponant D", 25 rue Leblanc, F-75015 Paris (FR).

(72) Inventeur; et

(71) Déposant : AUBERT, Guy G. [FR/FR]; 34 ter, rue des  
Feuillants, F-86000 Poitiers (FR).

(74) Mandataires : THEVENET, Jean-Bruno et al.; Cabinet  
BEAU DE LOMENIE, 158 Rue de l'Université, F-75340  
PARIS Cedex 07 (FR).

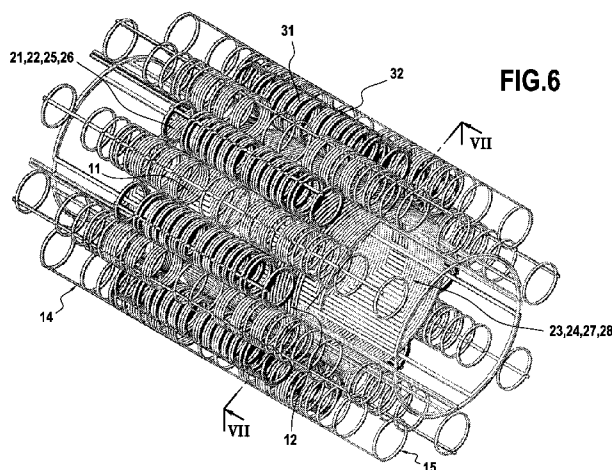
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre  
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,  
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,  
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,  
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,  
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,  
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,  
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,  
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,  
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,  
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,  
ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre  
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,  
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ,  
UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,  
TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,  
EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV,  
MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD AND SYSTEM FOR GENERATING MAGNETIC FIELD GRADIENTS FOR AN NMR IMAGING MA-  
CHINE

(54) Titre : PROCÉDÉ ET SYSTÈME DE GÉNÉRATION DE GRADIENTS DE CHAMP MAGNÉTIQUE POUR MACHINE  
D'IMAGERIE A RMN



(57) Abstract : The invention relates to a system for generating gradients, which is to be arranged around a space of interest having an axis Oz, and which includes: coils (11, 12) having a gradient z and an axis Oz; tubes having a gradient z and axes that are parallel to the axis Oz, and including coils (14, 15) and being arranged in a ring outside the coils (11, 12) having the gradient z; coils (21, 22, 23, 24) having a gradient x and saddle-shaped coils that have a gradient y, which are placed around coils (11, 12) having a gradient z; and tubes having gradients x and y and axes parallel to the axis Oz, and being arranged in a ring outside the coils (11, 12) having the gradient z while being positioned between the tubes having the gradient z, wherein each tube having the gradients x and y includes coils (31, 32).

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]



WO 2013/017777 A1



---

TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :  
— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

---

Le système de génération de gradients, disposé autour d'un volume d'intérêt d'axe Oz, comprend des bobines (11, 12) de gradient z, d'axe Oz; des tubes de gradient z d'axes parallèles à l'axe Oz comprenant des bobines (14, 15) et disposés en couronne à l'extérieur des bobines (11, 12) de gradient z; des bobines (21, 22, 23, 24) de gradient x et des bobines (25, 26, 27, 28) de gradient y en forme de selle de cheval disposées autour des bobines (11, 12) de gradient z; des tubes de gradients x et y d'axes parallèles à l'axe Oz et situés en couronne à l'extérieur des bobines (11, 12) de gradient z, en étant intercalés entre les tubes de gradient z, chacun des tubes de gradient x et y comprenant des bobines (31, 32).

Procédé et système de génération de gradients de champ magnétique  
pour machine d'imagerie à RMN

5 Domaine de l'invention

La présente invention a pour objet un procédé et un système de  
génération de gradients de champ magnétique pour créer un gradient de  
champ magnétique dans un volume d'intérêt d'une machine de résonance  
10 magnétique nucléaire (RMN) ou d'imagerie par résonance magnétique  
(IRM) à aimant supraconducteur.

L'invention concerne également une machine d'imagerie par  
résonance magnétique nucléaire à gradients améliorés.

15 Art antérieur

Un appareil d'imagerie par résonance magnétique nucléaire  
comporte essentiellement trois types de bobines ou équivalents.

Un premier type de bobines, qui peut être remplacé par un aimant  
20 permanent, a pour objet de créer un champ magnétique principal  
homogène intense  $B_0$  dans un volume d'intérêt prédéterminé. Par champ  
magnétique intense, on entend un champ magnétique au moins égal à  
0,5T, de préférence supérieur ou égal à 1T, et qui dans certaines  
réalisations peut dépasser 10T, pour des applications de RMN ou d'IRM. La  
25 première bobine peut par exemple être constituée par une bobine  
supraconductrice d'aimantation principale placée dans un cryostat.

Un deuxième type de bobines, dites radiofréquence, a pour but de  
soumettre un corps ou objet examiné et placé sous l'influence du champ  
principal des premières bobines, ou de l'aimant permanent, à des

séquences d'excitation radiofréquence, et de mesurer un signal radiofréquence réémis en retour par des particules du corps ou de l'objet examiné. La réponse radiofréquence est une réponse en volume : toutes les particules d'une région du corps soumises à l'examen émettent en même temps leur réponse radiofréquence. Pour créer une image, il est nécessaire de différencier ces réponses.

Un troisième type de bobines, dites de gradient permet précisément de superposer au champ principal intense  $B_0$  des composantes d'un champ magnétique supplémentaire. La valeur de ces composantes est fonction des coordonnées dans l'espace de leur lieu d'application. Classiquement, on organise cette différenciation selon trois axes orthogonaux X, Y, Z. Par convention, l'axe Z est généralement pris colinéaire au champ intense  $B_0$  créé par le premier type de bobines ou l'aimant permanent. Chaque lieu de l'espace peut ainsi être codé par une valeur de champ différente et on exploite dans le signal réémis les modifications qui en résultent pour créer l'image.

L'acquisition d'une image nécessite donc au cours de l'application des séquences d'excitation radiofréquence, l'excitation conjointe de séquences de gradients de champ qui sont pulsés.

Le document EP-A-221810 présente des rappels concernant l'IRM et indique comment calculer des gradients qui soient les plus linéaires possibles compte tenu d'un encombrement donné, notamment pour des bobines de gradient selon X ou selon Y, dites en selle de cheval, qui constituent des bobines de gradient classiques.

D'une manière générale, un problème à résoudre consiste, pour un emplacement donné, à trouver des bobines de gradient qui produisent un gradient suffisamment fort et homogène et dont la self inductance soit faible. Ceci constitue des exigences contradictoires. En effet, pour que l'imagerie RMN soit de qualité, il convient que les gradients de champ

réels soient homogènes, c'est-à-dire respectent, avec une tolérance donnée, une distribution théorique idéale que l'on voudrait imposer. Pour accroître l'homogénéité des gradients produits, les bobines de gradient doivent être les plus grandes possibles, mais il convient également, pour  
5 des questions d'encombrement et de puissance, de ne pas augmenter exagérément la taille de ces bobines.

Par ailleurs, comme indiqué dans le document WO 89/03031, des écrans de protection sont le siège de courants de Foucault et nécessitent la mise en œuvre de dispositions particulières dans les bobines de  
10 gradient pour tenter de réduire l'influence de ces courants de Foucault qui tendent à s'opposer à l'établissement du champ magnétique supplémentaire de gradient désiré.

Dans le document WO 2005/029110, notamment en vue de réduire le bruit créé par des bobines de gradient conçues pour des machines de  
15 RMN du type tunnel créant un champ orienteur intense, on a proposé, pour réaliser les gradients, de consacrer l'espace annulaire disponible à la mise en place de tubes d'axes parallèles au champ principal dans lesquels sont engagées des bobines solénoïdales circulaires qui sont ainsi substituées aux bobines de gradient classiques en forme de selle de  
20 cheval. Les tubes peuvent être contigus les uns aux autres pour former une nappe de tubes.

La disposition des bobines solénoïdales circulaires dans des tubes permet généralement d'aboutir au résultat escompté de grande intensité des gradients produits, grâce à des possibilités de refroidissement  
25 améliorées, de respect des contraintes de linéarité imposées par les spécifications, de réduction des bruits acoustiques et dans une certaine mesure de limitation des courants de Foucault.

Toutefois, ces courants de Foucault peuvent dans certains cas rester gênants, notamment en provoquant un échauffement exagéré du

cryostat de l'aimant principal, qui augmente la consommation de fluide cryogénique, et l'interposition d'écrans entre des générateurs de gradients et le cryostat contribue à diminuer l'efficacité des gradients, même si elle permet de diminuer vers l'extérieur les champs électriques produits par les générateurs de gradients.

Pour remédier à ces inconvénients, dans le document WO 2007/048983, on a proposé de réaliser un premier ensemble de bobines de gradient solénoïdales placées dans des tubes disposés dans un premier espace annulaire cylindrique et un deuxième ensemble de bobines de gradient solénoïdales de compensation placées dans des tubes disposés dans un deuxième espace annulaire cylindrique coaxial au premier espace annulaire cylindrique et situé entre une enceinte cryogénique extérieure et le premier espace annulaire cylindrique, les sens de circulation des courants pulsés étant inversés dans les bobines du deuxième ensemble par rapport à celui des bobines du premier ensemble.

La présence du deuxième ensemble de bobines de gradient permet de réduire de façon efficace les courants induits et de limiter la distorsion des gradients que l'on souhaite produire, mais l'encombrement total est important, ce qui d'un point de vue pratique constitue un inconvénient.

Ces systèmes de l'art antérieur réalisent la compensation par deux ensembles de bobines du même type, soit classiques pour le système décrit dans le document WO 89/03031, soit « en tubes » pour le système précédent. Comme les bobines sont de même type, il en résulte nécessairement un affaiblissement du gradient que créeraient les bobines primaires seules

et la valeur souhaitée du gradient (par exemple des gradients de l'ordre de 70 mT/m) ne peut être obtenue qu'en sacrifiant la linéarité.

#### Définition et objet de l'invention

La présente invention vise à remédier aux inconvénients précités et à permettre la satisfaction d'exigences contradictoires en permettant d'obtenir une machine compacte, avec des gradients de champ magnétique de valeur nominale élevée, qui présentent cependant une  
5 excellente linéarité, avec un blindage efficace qui limite les courants induits dans les enveloppes conductrices extérieures, avec une résistance électrique et une inductance qui soient minimales et avec des bruits et vibrations également réduits.

10 L'invention vise encore à définir un procédé de réalisation d'un tel dispositif qui soit simplifié et permette néanmoins de satisfaire les exigences contradictoires mentionnées ci-dessus.

L'invention consiste schématiquement à réaliser un système hybride en combinant un premier ensemble de bobines classiques avec un second  
15 ensemble de bobines « en tubes » dont les gradients se renforcent mutuellement au lieu de s'affaiblir dans le volume d'intérêt, alors qu'ils réalisent à l'extérieur la compensation nécessaire à l'atténuation des courants de Foucault.

Ces buts sont atteints, conformément à l'invention, grâce à un  
20 système de génération de gradients de champ magnétique, disposé autour d'un volume d'intérêt (ZI) d'axe Oz dans une machine d'imagerie par résonance nucléaire, caractérisé en ce qu'il comprend au moins des premières et deuxièmes bobines solénoïdales de gradient z, d'axe Oz parcourues par des courants de sens opposés; un ensemble de premiers  
25 tubes identiques de gradient z d'axes parallèles à l'axe Oz comprenant chacun au moins des troisièmes et quatrième bobines solénoïdales parcourues par des courants de sens opposés et disposés en couronne à l'extérieur des premières et deuxièmes bobines de gradient z ; au moins des cinquième à huitième bobines de gradient x en forme de selle de

cheval et des neuvième à douzième bobines de gradient y en forme de selle de cheval disposées autour des première et deuxième bobines de gradient z; un ensemble de deuxième tubes identiques de gradients x et y d'axes parallèles à l'axe Oz et situés en couronne à l'extérieur des premières et deuxième bobines de gradient z, en étant intercalés entre les premiers tubes de gradient z sur la même couronne, chacun des deuxièmes tubes de gradient x et y comprenant au moins des treizième et quatorzième bobines solénoïdales parcourues par des courants de sens opposés, les directions x et y étant orthogonales entre elles et orthogonales à l'axe Oz.

De façon plus particulière, l'invention concerne un système de génération de gradients de champ magnétique disposé dans un premier espace annulaire cylindrique autour d'un tunnel d'axe Oz et de section essentiellement circulaire définissant un volume d'intérêt dans une machine d'imagerie par résonance magnétique nucléaire, pour créer un gradient de champ magnétique dans ledit volume d'intérêt, caractérisé en ce que le système de génération de gradients comprend, à l'intérieur du premier espace annulaire cylindrique, des première et deuxième bobines solénoïdales de gradient z comprenant chacune une même pluralité  $n_1$  de spires identiques d'axe Oz et de diamètre inférieur au diamètre externe du premier espace annulaire cylindrique, les spires de la deuxième bobine étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la première bobine pour produire une première composante de gradient de champ z dans une direction axiale z parallèle à l'axe Oz ; un ensemble de  $N_1$  premiers tubes non jointifs identiques d'axes parallèles à l'axe Oz et disposés dans un sous-espace annulaire cylindrique situé à l'intérieur dudit premier espace annulaire cylindrique à l'extérieur des dites première et deuxième bobines de gradient z, chacun des  $N_1$  premiers tubes comprenant des troisième et quatrième bobines solénoïdales de

gradient z symétriques par rapport à un plan xOy perpendiculaire à l'axe Oz, comprenant chacune une même pluralité  $n_2$  de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube, les spires de la

5 quatrième bobine disposée en regard de la deuxième bobine étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la deuxième bobine et à celui parcourant la troisième bobine disposée elle-même en regard de la première bobine pour produire une deuxième

10 composante de gradient de champ z dans ladite direction axiale z parallèle à l'axe Oz ; un ensemble de cinquième, sixième, septième et huitième bobines de gradient x ayant une configuration en forme de selle de cheval avec chacune un nombre  $n_3$  de spires, les cinquième, sixième, septième et huitième bobines de gradient x étant disposées au voisinage des première et deuxième bobines solénoïdales de gradient z, à des positions

15 symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe Oz pour produire une première composante de gradient de champ x dans une première direction radiale x de la machine perpendiculaire à l'axe Oz ; un ensemble de neuvième, dixième, onzième et douzième bobines de gradient y ayant une configuration en forme de selle de cheval avec

20 chacune un nombre  $n_4$  de spires, les neuvième, dixième, onzième et douzième bobines de gradient y étant disposées au voisinage des première et deuxième bobines solénoïdales de gradient z, à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe Oz, en superposition respectivement aux cinquième, sixième, septième et

25 huitième bobines de gradient x mais décalées de  $90^\circ$  par rapport à celles-ci pour produire une première composante de gradient de champ y dans une deuxième direction radiale y de la machine également perpendiculaire à l'axe Oz, la première direction x étant perpendiculaire à la deuxième direction y; un ensemble de  $N_2$  deuxième tubes non jointifs identiques

d'axes parallèles à l'axe Oz et situés dans ledit sous-espace annulaire cylindrique situé à l'intérieur dudit premier espace annulaire cylindrique à l'extérieur desdites première et deuxième bobines de gradient z, en étant intercalés entre lesdits premiers tubes, chacun des N2 deuxièmes tubes

5 comprenant des treizième et quatorzième bobines solénoïdales de gradient x et y symétriques par rapport à un plan xOy perpendiculaire à l'axe Oz, comprenant chacune une même pluralité n5 de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube, les spires de la

10 quatorzième bobine étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la treizième bobine pour produire une deuxième composante à la fois de gradient de champ x et de gradient de champ y.

Selon un mode particulier de réalisation avantageux, les première et

15 deuxième bobines solénoïdales de gradient z et les troisième et quatrième bobines solénoïdales de gradient z sont monocouches.

Selon une autre caractéristique préférentielle de l'invention, les cinquième, sixième, septième et huitième bobines de gradient x et les neuvième, dixième, onzième et douzième bobines de gradient y sont

20 monocouches tandis que les treizième et quatorzième bobines solénoïdales de gradient x et y sont bicouches.

Ces caractéristiques ne sont pas limitatives et les bobines solénoïdales de gradient z pourraient par exemple comprendre deux couches. Les treizième et quatorzième bobines solénoïdales de gradient x

25 et y pourraient également comprendre un nombre de couches différent de deux, par exemple trois couches.

Selon un mode particulier de réalisation, les N2 deuxièmes tubes sont plus courts que les N1 premiers tubes.

Selon un mode de réalisation préférentiel, le système de génération de gradients comprend dans le sous-espace cylindrique une couronne de 12, 16 ou 24 tubes comprenant lesdits deuxièmes tubes alternant avec lesdits premiers tubes.

5 L'invention concerne également une machine d'imagerie par résonance magnétique nucléaire à gradients améliorés, comprenant un tunnel d'axe Oz et de section essentiellement circulaire définissant un volume d'intérêt ZI, un premier espace annulaire cylindrique entourant ledit volume d'intérêt ZI et comprenant un système de génération de  
10 gradients de champ magnétique pour créer un gradient de champ magnétique dans ledit volume d'intérêt ZI, un deuxième espace annulaire cylindrique extérieur formant cryostat entourant ledit premier espace annulaire cylindrique et comprenant un dispositif d'aimant supraconducteur pour générer une composante de champ magnétique  
15 homogène Bz selon ledit axe Oz dans ledit volume d'intérêt ZI, un dispositif d'antennes d'émission radiofréquence disposé à l'intérieur dudit tunnel ou au voisinage de celui-ci dans le premier espace annulaire cylindrique et des dispositifs d'alimentation électrique du système de génération de gradients et du dispositif d'antennes, caractérisée en ce que  
20 le système de génération de gradients est réalisé de la manière définie ci-dessus.

L'invention concerne également un procédé de réalisation d'un système de génération de gradients de champ magnétique, disposé autour d'un volume d'intérêt (ZI) d'axe Oz dans une machine d'imagerie par  
25 résonance nucléaire, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- former au moins des premières et deuxièmes bobines solénoïdales de gradient z, d'axe Oz parcourues par des courants de sens opposés ;

- 5 - former un ensemble de premiers tubes identiques de gradient z d'axes parallèles à l'axe Oz comprenant chacun au moins des troisièmes et quatrième bobines solénoïdales parcourues par des courants de sens opposés et disposés en couronne à l'extérieur des premières et deuxièmes bobines de gradient z ;
- former au moins des cinquième à huitième bobines de gradient x en forme de selle de cheval disposées autour des première et deuxième bobines de gradient z;
- 10 - former au moins des neuvième à douzième bobines de gradient y en forme de selle de cheval disposées autour des première et deuxième bobines de gradient z;
- former un ensemble de deuxièmes tubes identiques de gradients x et y d'axes parallèles à l'axe Oz et situés en couronne à l'extérieur des premières et deuxièmes bobines de gradient z, en étant  
15 intercalés entre les premiers tubes de gradient z sur la même couronne, chacun des deuxièmes tubes de gradient x et y comprenant au moins des treizième et quatorzième bobines sinusoïdales parcourues par des courants de sens opposés, les directions x et y étant orthogonales entre elles et orthogonales à  
20 l'axe z; et
- déterminer les caractéristiques de l'ensemble des bobines solénoïdales à l'aide du développement en harmoniques sphériques solides réguliers de la composante Bz du champ magnétique créé dans la zone d'intérêt (ZI) par chaque spire ou arc de spire d'une  
25 bobine solénoïdale, en fonction de la puissance disponible de l'alimentation électrique des bobines, du diamètre externe du tunnel définissant la zone d'intérêt (ZI) et du diamètre interne d'un deuxième espace annulaire cylindrique extérieur comprenant un dispositif d'aimant supraconducteur.

L'invention concerne de façon plus particulière un procédé de réalisation d'un système de génération de gradients de champ magnétique disposé dans un premier espace annulaire cylindrique autour d'un tunnel d'axe Oz et de section essentiellement circulaire définissant un volume d'intérêt ZI dans une machine d'imagerie par résonance magnétique nucléaire comprenant un deuxième espace annulaire cylindrique extérieur formant cryostat entourant ledit premier espace annulaire cylindrique et comprenant un dispositif d'aimant supraconducteur pour générer une composante de champ magnétique homogène  $B_z$  selon ledit axe Oz dans ledit volume d'intérêt ZI, , pour créer un gradient de champ magnétique dans ledit volume d'intérêt ZI, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- former à l'intérieur dudit premier espace annulaire cylindrique, des première et deuxième bobines solénoïdales de gradient z comprenant chacune une même pluralité  $n_1$  de spires identiques d'axe Oz et de diamètre inférieur au diamètre externe du premier espace annulaire cylindrique, les spires de la deuxième bobine étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la première bobine pour produire une première composante de gradient de champ z dans une direction axiale z parallèle à l'axe Oz ;
- former un ensemble de  $N_1$  premiers tubes non jointifs identiques d'axes parallèles à l'axe Oz et disposés dans un sous-espace annulaire cylindrique situé à l'intérieur dudit premier espace annulaire cylindrique à l'extérieur desdites première et deuxième bobines de gradient z, chacun des  $N_1$  premiers tubes comprenant des troisième et quatrième bobines solénoïdales de gradient z symétriques par rapport à un plan xOy perpendiculaire à l'axe Oz, comprenant chacune une même pluralité  $n_2$  de spires identiques de

- diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube, les spires de la quatrième bobine disposée en regard de la deuxième bobine étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la deuxième bobine et à celui parcourant les spires de la troisième bobine elle-même disposée en regard de la première bobine pour produire une deuxième composante de gradient de champ z dans ladite direction axiale z parallèle à l'axe Oz ;
- 5
- 10 - former un ensemble de cinquième, sixième, septième et huitième bobines de gradient x ayant une configuration en forme de selle de cheval avec chacune un nombre  $n_3$  de spires, les cinquième, sixième, septième et huitième bobines de gradient x étant disposées au voisinage des première et deuxième bobines solénoïdales de gradient z, à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe Oz pour produire une première composante de gradient de champ x dans une première direction radiale x de la machine perpendiculaire à l'axe Oz ;
- 15
- 20 - former un ensemble de neuvième, dixième, onzième et douzième bobines de gradient y ayant une configuration en forme de selle de cheval avec chacune un nombre  $n_4$  de spires, les neuvième, dixième, onzième et douzième bobines de gradient y étant disposées au voisinage des première et deuxième bobines solénoïdales de gradient z, à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe Oz, en superposition respectivement aux cinquième, sixième, septième et huitième bobines de gradient x mais décalées de  $90^\circ$  par rapport à celles-ci pour produire une première composante de gradient de champ y dans une deuxième direction radiale y de la machine également
- 25

- perpendiculaire à l'axe Oz, la première direction x étant perpendiculaire à la deuxième direction y;
- 5 - former un ensemble de N2 deuxièmes tubes non jointifs identiques d'axes parallèles à l'axe Oz et situés dans ledit sous-espace annulaire cylindrique situé à l'intérieur dudit premier espace annulaire cylindrique à l'extérieur desdites première et deuxième bobines de gradient z, en étant intercalés entre lesdits premiers tubes, chacun des N2 deuxièmes tubes comprenant des treizième et quatorzième bobines solénoïdales de gradient x et y symétriques
- 10 par rapport à un plan xOy perpendiculaire à l'axe Oz, comprenant chacune une même pluralité n5 de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube, les spires de la quatorzième bobine disposée en regard de la deuxième bobine étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la deuxième bobine et à celui parcourant les spires de la treizième bobine elle-même disposée en regard de la première bobine pour produire une deuxième composante à la fois de gradient de champ x et de gradient de champ y ; et
- 15 - déterminer les caractéristiques de l'ensemble des bobines solénoïdales à l'aide du développement en harmoniques sphériques solides réguliers de la composante Bz du champ magnétique créé dans la zone d'intérêt par chaque spire ou arc de spire d'une bobine solénoïdale, en fonction de la puissance disponible de l'alimentation électrique des bobines, du diamètre externe du tunnel définissant la
- 20 zone d'intérêt ZI et du diamètre interne dudit deuxième espace annulaire cylindrique extérieur comprenant le dispositif d'aimant supraconducteur.
- 25

### Brève description des dessins

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description suivante de modes particuliers de réalisation de l'invention  
5 donnés à titre d'exemples en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- 10 - La figure 1 représente une vue schématique en coupe axiale d'un premier exemple de dispositif de production de gradient z hybride de champ magnétique pouvant être inclus dans un système de génération de champ magnétique selon l'invention,
- La figure 1A représente de façon agrandie une partie de la figure 1,
- La figure 2 représente une vue schématique en coupe axiale d'un deuxième exemple de dispositif de production de gradient z hybride de champ magnétique pouvant être inclus dans un système de  
15 génération de champ magnétique selon l'invention,
- La figure 2A représente de façon agrandie une partie de la figure 2,
- La figure 3 représente de façon agrandie une partie de la figure 2A,
- La figure 4 est une vue schématique en coupe perpendiculaire à l'axe montrant les différents sous-ensembles composant un  
20 système de génération de gradients hybrides selon l'invention,
- La figure 5 représente une partie agrandie de la figure 4,
- La figure 5A représente de façon encore plus agrandie une partie de la figure 5,
- La figure 6 est une vue schématique en perspective de l'ensemble  
25 d'un système de génération de gradients hybrides selon l'invention,
- La figure 7 est une vue en coupe selon le plan VII-VII de la figure 6,
- La figure 8 est une vue schématique en perspective d'une partie du système de génération de gradients hybrides de la figure 6

comprenant un premier dispositif de création de gradients x et y en forme de « selles de cheval » et un dispositif complémentaire de création de gradients x et y à l'aide de bobines solénoïdales « en tubes »,

- 5
- La figure 9 est une vue schématique en perspective d'une partie du système de génération de gradients hybrides de la figure 6 comprenant un premier dispositif de création de gradients x et y en forme de « selles de cheval »,
  - La figure 10 est une vue schématique en perspective d'une partie
- 10
- du système de génération de gradients hybrides de la figure 6 comprenant un premier dispositif de création de gradient z à l'aide de bobines classiques et un dispositif complémentaire de création de gradient z à l'aide de bobines solénoïdales « en tubes »,
  - Les figures 11 et 12 représentent en vue développée en plan deux
- 15
- exemples possibles de réalisation de bobines en forme de selle de cheval utilisables dans le cadre du premier dispositif de création de gradients x et y,
  - Les figures 13 à 18 représentent divers exemples de réalisation de transitions inter-spines pour des bobines en forme de selle de
- 20
- cheval telles que celles des figures 11 et 12 ou des bobines solénoïdales, et
  - La figure 19 représente de façon schématique un exemple de machine d'imagerie par résonance magnétique nucléaire selon l'art antérieur à laquelle est applicable l'invention.

25

Description détaillée de modes de réalisation préférentiels

On rappellera d'abord en référence à la figure 19 le principe d'une machine 7 d'imagerie par résonance magnétique (IRM) à laquelle est applicable l'invention.

5 Une zone annulaire cylindrique extérieure 2 incorpore un dispositif de création d'un champ magnétique principal homogène et intense  $B_0$  essentiellement parallèle à l'axe z d'un tunnel 4 dans lequel est installé un patient 5 ou un objet à examiner.

Le dispositif de création d'un champ magnétique principal homogène et intense  $B_0$  comprend de façon privilégiée un aimant supraconducteur placé dans un cryostat destiné à maintenir cet aimant supraconducteur à très basse température. Dans tous les cas, le dispositif de création d'un champ magnétique intense est placé dans l'enceinte externe annulaire cylindrique 2 qui ménage un espace annulaire cylindrique 1 entre la paroi interne de cette enceinte externe 2 et le tunnel 4.

Un système 8 de génération de gradients de champ magnétique à la fois selon la direction de l'axe z du tunnel et selon les directions x et y perpendiculaires entre elles et à l'axe z est disposé dans l'espace annulaire 1.

20 Comme on l'a indiqué précédemment, les bobines du générateur de gradients 8 servent à créer un codage dans l'espace où se trouve le patient 5 par l'application de champs magnétiques supplémentaires pulsés.

Les composantes de ces champs qui ne sont pas orientés comme le champ orienteur  $B_0$  contribuent au deuxième ordre seulement (et donc de manière négligeable pour les valeurs considérées de  $B_0$  et des gradients) à la modification du signal de RMN utile. Ainsi, la seule composante de ces champs magnétiques produite par les bobines de gradient, qui est intéressante et utile est la composante orientée selon le champ  $B_0$ . Cette composante utile est appelée traditionnellement composante  $B_z$ . La

machine est repérée par rapport à un référentiel cartésien, l'axe z étant colinéaire à la direction du champ uniforme  $B_0$  et parallèle aux génératrices de la machine tunnel. Selon les différents jeux de bobines de gradient alimentés, la composante  $B_z$  utile en un lieu verra son amplitude  
5 croître en fonction de l'abscisse x d'un plan contenant ce lieu, parallèle au plan yOz pour les gradients x, en fonction de l'ordonnée y d'un plan contenant ce lieu, parallèle au plan xOz pour les gradients y, ou en fonction de la cote z d'un plan contenant ce lieu, parallèle au plan xOy pour les gradients z.

10 Un dispositif 3 d'antennes d'émission radiofréquence est disposé au voisinage du tunnel 4 ou est inséré directement dans ce tunnel. Les bobines ou antennes d'émission radiofréquence sont associées de façon classique à des dispositifs de réception et de traitement des signaux radiofréquence émis en réponse par le corps du patient 5 ou tout autre  
15 objet étudié, tel qu'un animal par exemple.

On a représenté de façon symbolique sur la figure 19 un dispositif 6 d'alimentation électrique des bobines de gradient du système 8 de génération de gradients et du dispositif 3 d'antennes d'émission radiofréquence.

20 Les figures 6 et 7 permettent de voir l'ensemble des différents éléments composant un système 8 de génération de gradients de champ magnétique selon l'invention pouvant être intégré dans un espace annulaire cylindrique tel que l'espace 1 de la machine d'IRM 7 représentée schématiquement sur la figure 19.

25 Le système 8 de génération de gradients comprend en premier lieu, à l'intérieur de l'espace annulaire cylindrique 1, des première et deuxième bobines solénoïdales 11, 12 de gradient z comprenant chacune une même pluralité  $n_1$  de spires identiques d'axe Oz et de diamètre inférieur au diamètre externe de l'espace annulaire cylindrique 1, les spires de la

deuxième bobine 12 étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la première bobine 11 pour produire une première composante de gradient de champ  $z$  dans une direction axiale  $z$  parallèle à l'axe  $Oz$ .

5 Le système 8 de génération de gradients comprend en second lieu un ensemble de  $N_1$  premiers tubes 13 non jointifs identiques d'axes parallèles à l'axe  $Oz$  et disposés dans un sous-espace annulaire cylindrique 9 situé à l'intérieur de l'espace annulaire cylindrique 1 à l'extérieur des première et deuxième bobines 11, 12 de gradient  $z$ , chacun des  $N_1$   
10 premiers tubes 13 comprenant des troisième et quatrième bobines solénoïdales 14, 15 de gradient  $z$  symétriques par rapport à un plan  $xOy$  perpendiculaire à l'axe  $Oz$ , comprenant chacune une même pluralité  $n_2$  de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant 13 et réparties dans des positions prédéterminées selon  
15 l'axe de ce tube 13, les spires de la quatrième bobine 15 disposée en regard de la deuxième bobine 12 étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la deuxième bobine 12 et à celui parcourant les spires de la troisième bobine 14 elle-même disposée en regard de la première bobine 11 pour produire une deuxième composante  
20 de gradient de champ  $z$  dans la direction axiale  $z$  parallèle à l'axe  $Oz$ .

La figure 10 montre en perspective un exemple de bobines 11 et 12 coopérant avec une pluralité de couples de bobines 14, 15 disposées en couronne autour des bobines 11 et 12 et représentées sans les tubes 13.

La figure 4 montre un exemple de répartition de tubes 13 autour  
25 des bobines 11 et 12.

Les figures 1, 1A et 3 montrent un premier exemple d'association de bobines 11, 12 de gradient  $z$  d'axe  $Oz$  avec des couples de bobines 14, 15 placées dans des tubes 13 d'axe parallèle à l'axe  $Oz$  et disposés en couronne autour des bobines 11, 12. Ce premier exemple de réalisation

permet d'annuler la composante  $Z_3$  dans un développement en harmoniques sphériques réguliers (DHS). Les bobines 11, 12 peuvent par exemple comprendre un nombre  $n_1$  de 11 spires groupées juxtaposées selon l'axe Oz.

5 Les figures 2 et 2A montrent un deuxième exemple d'association de bobines 111, 112 de gradient z d'axe Oz avec des couples de bobines 114, 115 placées dans des tubes 13 d'axe parallèle à l'axe Oz et disposés en couronne autour des bobines 111, 112. Ce deuxième exemple de réalisation permet d'annuler les composantes  $Z_3$  et  $Z_5$  dans un  
10 développement en harmoniques sphériques réguliers (DHS). Dans ce cas, les bobines 111 et 112 comprennent chacune un nombre  $n'_1$  de spires avec par exemple un premier groupe 111A, 112A de 13 spires groupées juxtaposées selon l'axe Oz et une spire supplémentaire isolée 111B, 112B décalée selon l'axe Oz. Le nombre  $n'_2$  et la répartition des spires des  
15 bobines 114 et 115 selon l'axe Oz sont également différents du nombre  $n_2$  et de la répartition des spires des bobines 14 et 15 selon l'axe Oz. Le calcul en DHS est en effet opéré sur l'ensemble des bobines 11, 12, 14 et 15 pour annuler la composante  $Z_3$  ou sur l'ensemble des bobines 111, 112, 114 et 115 pour annuler les composantes  $Z_3$  et  $Z_5$ .

20 L'ensemble constitué des paires de bobines 11, 12 et 14, 15 ou celui constitué des paires de bobines 111, 112 et 114, 115 constituent un système de gradients hybrides selon z.

Le système 8 de génération de gradients comprend également des systèmes de gradients hybrides selon x et y.

25 Ainsi, le système 8 de génération de gradients comprend en troisième lieu un ensemble de cinquième, sixième, septième et huitième bobines de gradient x ayant une configuration en forme de selle de cheval avec chacune un nombre  $n_3$  de spires, les cinquième, sixième, septième et huitième bobines 21, 22, 23, 24 de gradient x étant disposées au

voisinage des première et deuxième bobines solénoïdales 11, 12 de gradient z, à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe Oz pour produire une première composante de gradient de champ x dans une première direction radiale x de la machine  
5 perpendiculaire à l'axe Oz.

Pour la réalisation des systèmes de gradients hybrides selon x et y, le système 8 de génération de gradients comprend en quatrième lieu un ensemble de neuvième, dixième, onzième et douzième bobines 25, 26, 27, 28 de gradient y ayant une configuration en forme de selle de cheval avec  
10 chacune un nombre  $n_4$  de spires, les neuvième, dixième, onzième et douzième bobines 25, 26, 27, 28 de gradient y étant disposées au voisinage des première et deuxième bobines solénoïdales 11, 12 de gradient z, à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe Oz, en superposition respectivement aux cinquième,  
15 sixième, septième et huitième bobines 21, 22, 23, 24 de gradient x mais décalées de  $90^\circ$  par rapport à celles-ci pour produire une première composante de gradient de champ y dans une deuxième direction radiale y de la machine également perpendiculaire à l'axe Oz, la première direction x étant perpendiculaire à la deuxième direction y. La figure 9  
20 montre un exemple possible de mise en œuvre des bobines 21 à 24 et 25 à 28 pour la création d'une première composante de gradient x et y.

Enfin, pour la réalisation des systèmes de gradients hybrides selon x et y, le système 8 de génération de gradients comprend en cinquième lieu un ensemble de  $N_2$  deuxièmes tubes 29 non jointifs identiques d'axes  
25 parallèles à l'axe Oz et situés dans le sous-espace annulaire cylindrique 9 situé à l'intérieur du premier espace annulaire cylindrique 1 à l'extérieur des première et deuxième bobines 11, 12 de gradient z, en étant intercalés entre les premiers tubes 13, chacun des  $N_2$  deuxièmes tubes 29 comprenant des treizième et quatorzième bobines solénoïdales 31, 32 de

gradient x et y symétriques par rapport à un plan xOy perpendiculaire à l'axe Oz, comprenant chacune une même pluralité n5 de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant 29 et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube 29, les

5 spires de la quatorzième bobine 32 disposée en regard de la deuxième bobine 12 étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la deuxième bobine 12 et à celui parcourant les spires de la treizième bobine 31 elle-même disposée en regard de la première bobine 11 pour produire une deuxième composante à la fois de

10 gradient de champ x et de gradient de champ y.

La figure 8 montre un exemple possible de mise en œuvre à la fois des bobines 21 à 24 et 25 à 28 et d'une pluralité de paires de bobines 31, 32 réparties en couronne autour des bobines 21 à 24 et 25 à 28 pour la création de gradients hybrides x et y.

15 On donnera ci-dessous certains éléments de calcul permettant de déterminer les caractéristiques des différentes bobines constituant le système 8 de génération de gradients hybrides.

Pour le calcul, on prend en considération des éléments de base constitués par des arcs de spires circulaires (ou des spires complètes) d'axe Oz et des spires circulaires d'axe O'z' parallèle à Oz .

20

On peut établir à partir des équations fondamentales de l'électromagnétisme les expressions analytiques des composantes du champ et du potentiel vecteur magnétiques générés par de tels éléments en tout point de l'espace ainsi que les coefficients  $Z_n, X_n^m$  et  $Y_n^m$  du développement en harmoniques sphériques solides réguliers (DHS) de la

25 composante  $B_z$  du champ magnétique qu'ils créent dans la région d'intérêt ZI au voisinage du point (ROI) suivant l'expression :

$$B_z = Z_0 + \sum_{n=1}^{\infty} r^n \left[ Z_n P_n(\cos \vartheta) + \sum_{m=1}^n (X_n^m \cos m\varphi + Y_n^m \sin m\varphi) P_n^m(\cos \vartheta) \right]$$

On donne ci-après quelques exemples de ces expressions.

1.1 Composantes du potentiel vecteur et du champ d'une spire en tout point

5 Soit une spire circulaire d'axe Oz, de rayon  $a$ , centrée en un point de cote  $b$  et parcourue par un courant d'intensité  $I$  mesuré algébriquement autour de Oz. En un point de coordonnées cylindriques  $(\rho, \varphi, z)$ , les seules composantes non nulles du potentiel vecteur et du champ ont pour expressions :

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I r_1}{2\pi \rho} \left[ \left( 1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) - E(k) \right]$$

$$B_\rho = \frac{\mu_0 I b - z}{2\pi \rho r_1} \left[ K(k) - \frac{a^2 + \rho^2 + (b - z)^2}{r_2^2} E(k) \right]$$

10  $B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1} \left[ K(k) + \frac{a^2 - \rho^2 - (b - z)^2}{r_2^2} E(k) \right]$

$K(k)$  et  $E(k)$  sont respectivement les intégrales elliptiques complètes de première espèce et de deuxième espèce, avec les notations suivantes :

$$k = \frac{2\sqrt{a\rho}}{r_1}$$

$$r_1 = \sqrt{(a + \rho)^2 + b^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(a - \rho)^2 + b^2}$$

15 Pour un arc de spire, il n'y a plus symétrie de révolution et toutes les composantes existent avec des expressions un peu plus compliquées qui font intervenir des intégrales elliptiques incomplètes.

1.2 DHS d'un arc de spire

Soit un arc de spire d'axe Oz , de rayon  $a$  et de cote  $b$  , parcouru par un courant d'intensité  $I$  entre les angles  $\psi_1$  et  $\psi_2$  , mesurés algébriquement autour de Oz.

En posant  $c = \sqrt{a^2 + b^2}$  et  $\cos \alpha = \frac{b}{c}, 0 \leq \alpha \leq \pi$  , on obtient le résultat

5 suivant :

$$B_z = \frac{\mu_0 I (\psi_2 - \psi_1)}{2c} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{c}\right)^n \sin \alpha P_{n+1}^1(\cos \alpha) P_n(\cos \vartheta) + \frac{\mu_0 I}{c} \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{c}\right)^n \sum_{m=1}^n \left\{ \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \left[ \frac{1}{m} \sin \alpha P_{n+1}^{m+1}(\cos \alpha) - P_n^m(\cos \alpha) \right] \times \sin m \frac{\psi_2 - \psi_1}{2} \cos m \left( \varphi - \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} \right) \right\} P_n^m(\cos \vartheta)$$

10 Pour une spire complète  $\psi_2 - \psi_1 = 2\pi$  , on retrouve le résultat élémentaire bien connu :

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2c} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{c}\right)^n \sin \alpha P_{n+1}^1(\cos \alpha) P_n(\cos \vartheta)$$

### 1.3 DHS d'une spire d'axe décalé

Soit une spire circulaire d'axe O'z', de rayon  $a$  , de cote  $b$  , parcourue par un courant d'intensité  $I$ . Les coordonnées cylindriques dans le référentiel

15 Oxyz du centre  $\Omega$  de la spire sont notées  $(\rho_0, \varphi_0, b)$  et la trace O' de O'z' sur le plan xOy a pour coordonnées cylindriques  $(\rho_0, \varphi_0, 0)$  . Les expressions analytiques des coefficients du DHS font intervenir des intégrales elliptiques complètes de première espèce,  $K(k)$  , et de deuxième espèce,  $E(k)$  . Elles deviennent de plus en plus encombrantes  
20 quand le degré  $n$  et l'ordre  $m$  augmentent, mais elles se manipulent très

bien avec un logiciel de calcul formel comme par exemple celui connu sous la dénomination Maple. On trouvera ci-après leurs expressions pour  $n=m=1$  :

$$Z_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{b}{r_1^3 r_2^2} \left[ (\rho_0^2 - a^2 + b^2) K(k) - \frac{(\rho_0^2 - a^2 + b^2)^2 + 4a^2(2\rho_0^2 - 2a^2 - b^2)}{r_2^2} E(k) \right]$$

$$\begin{pmatrix} X_1^1 \\ Y_1^1 \end{pmatrix} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{\rho_0 r_1^3 r_2^2} \left\{ \begin{array}{l} \left[ (\rho_0^2 - a^2)^2 + b^2(\rho_0^2 + a^2) \right] K(k) \\ \frac{(\rho_0^2 - a^2)^2 (\rho_0^2 + a^2 + 2b^2) + b^4(\rho_0^2 + a^2) - 8\rho_0^2 a^2 b^2}{r_2^2} E(k) \end{array} \right\} \begin{pmatrix} \cos \\ \sin \end{pmatrix}$$

$$k = \frac{2\sqrt{a\rho_0}}{r_1}$$

$$r_1 = \sqrt{(a + \rho_0)^2 + b^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(a - \rho_0)^2 + b^2}$$

5

Le système de gradients 8 doit s'insérer dans l'ouverture circulaire libre (dont le diamètre peut être typiquement de 900 mm) de l'aimant principal situé dans l'espace annulaire cylindrique extérieur 2 et laisser une  
 10 ouverture circulaire libre (dont le diamètre peut être typiquement d'au moins 550 mm) pour le tunnel 4, qui soit suffisante pour l'insertion du patient et l'installation des antennes 3.

Il faut une certaine épaisseur radiale pour les couches de gradients classiques comprenant deux couches 16, 17 de bobines 21 à 24 et 25 à 28  
 15 en forme de selle de cheval pour les gradients x et y et une couche de bobines 11, 12 (ou 111, 112) de gradient z, à l'intérieur de la couronne de tubes 13 et 29 (voir les figures 4, 5 et 7). Dans cette solution privilégiée avec trois couches classiques 12 et 13, 16 et 17 (pour le gradient z et les gradients x, y) situées à l'intérieur de l'espace annulaire occupé par les

tubes 13, 29, chaque couche 12 et 13, 16 et 17 occupe radialement 8 mm environ.

Ces considérations permettent de déterminer le nombre et le diamètre des tubes 13, 29 qui occuperont le maximum de l'espace disponible. Selon un exemple préférentiel, ceci conduit à un nombre privilégié de 16 tubes 13 ou 29, dont huit tubes référencés 13 (un sur deux) seront consacrés au gradient z et les huit autres tubes référencés 29 seront consacrés aux gradients x et y par superposition des courants correspondants dans les mêmes bobinages 31, 32.

Il est à remarquer que suivant la place disponible, on peut envisager d'autres combinaisons et donc des nombres différents pour les N1 tubes 13 et les N2 tubes 29, le nombre total  $N1 + N2$  de tubes 13, 29 augmentant si l'on diminue l'épaisseur radiale totale du générateur de gradient 8. On peut ainsi envisager par exemple un nombre total de tubes  $N1 + N2$  égal à 12 ou 24 au lieu de 16.

Contrairement à ce qui serait possible pour des dispositifs de gradients en tubes seuls, c'est-à-dire pour un générateur de gradients n'incluant ni les bobines 11, 12 (ou 111, 112) produisant une première composante de gradient z ni les bobines 21 à 24 et 25 à 28 en selles de cheval produisant une première composante de gradients x et y, il n'est pas possible d'obtenir à la fois la linéarité et le blindage (c'est-à-dire une réduction des courants induits) tout en faisant « cohabiter » les bobinages 14, 15 ou 114, 115 pour le gradient z d'une part, et les bobinages 31, 32 pour les gradients x et y d'autre part, dans les mêmes tubes, d'où la séparation en deux familles de tubes 13 et 29 respectivement. Comme on peut le voir sur la figure 6, les bobinages 31 et 32 peuvent être plus courts que les bobinages 14 et 15 ou 114 et 115 et par suite, les tubes 13 incorporant les bobinages 31 et 32 peuvent être plus courts que les tubes 29 incorporant les bobinages 14 et 15 ou 114 et 115.

Un système 8 de génération de gradients présente des contraintes de refroidissement et d'alimentation électrique.

Ainsi, les amplificateurs et leurs composants électroniques disponibles, incorporés dans le dispositif d'alimentation 6 de la figure 19, conditionnent l'intensité nominale dans les conducteurs (typiquement en cuivre) du système 8 ainsi que la tension maximum admissible lors de la 5 génération des impulsions de courant correspondant à la séquence d'imagerie choisie.

Cette intensité nominale est typiquement de plusieurs centaines d'ampères (par exemple 625 A dans les exemples donnés) et elle 10 détermine la section minimale des conducteurs compatible avec les modalités d'évacuation de la chaleur par circulation d'un fluide caloporteur (eau, huile, air...). La section des conducteurs peut-être différente pour les bobinages des tubes ou pour les bobinages classiques mais elle sera 15 typiquement de quelques dizaines de  $\text{mm}^2$ , par exemple un méplat de cuivre de  $10 \times 4 \text{ mm}^2$  dans les exemples donnés.

Dans les tubes 13 ou 29, les bobinages sont constitués de spires circulaires à des positions déterminées sur une couche (bobines 14, 15 ou 114, 115 de gradient z) ou sur plusieurs couches, par exemple deux 20 couches (bobines 31, 32 de gradients x et y). La détermination peut être effectuée par exemple conformément à l'enseignement du document WO 2005/029110 A2.

Pour les couches « classiques », les bobinages 11, 12 ou 111, 112 du gradient z sont des spires circulaires d'axe Oz à des positions 25 déterminées sur une seule couche alors que les bobinages 21 à 24 et 25 à 28 du gradient x ou du gradient y sont des selles de cheval rectangulaires de positions et dimensions déterminées, par exemple suivant les documents de brevet EP 0 221 810 A1 ou WO 8903031 A, ou des selles de

cheval de formes plus complexes par exemple suivant le document de brevet US 4 617 516 A ou EP 0 140 259 B1.

Selon un aspect important de la présente invention, on détermine les caractéristiques de l'ensemble des bobines solénoïdales à l'aide du développement en harmoniques sphériques solides réguliers de la composante  $B_z$  du champ magnétique créé dans la zone d'intérêt ZI par chaque spire ou arc de spire d'une bobine solénoïdale, en fonction de la puissance disponible de l'alimentation électrique des bobines, du diamètre externe du tunnel 4 définissant la zone d'intérêt ZI et du diamètre interne du deuxième espace annulaire cylindrique 2 extérieur comprenant le dispositif d'aimant supraconducteur. Chaque dispositif de gradient hybride, par exemple composé des éléments 11 à 15 pour le gradient  $z$  et des éléments 21 à 24, 25 à 28, 29, 31, 32 pour les gradients  $x$  et  $y$ , qui comprend d'une part un dispositif « classique » et d'autre part un dispositif « en tubes » est déterminé globalement à partir de DHS comme indiqué plus haut.

On donnera ci-dessous différentes considérations concernant l'obtention de la configuration optimale pour le gradient  $z$ .

Dans chacun des  $N_2$  tubes 13 dédiés au gradient  $z$ , on dispose  $2 \times n_2$  spires de plus grand diamètre possible (bobines 14 et 15), dont les positions axiales sont des inconnues à déterminer. Les spires sont géométriquement symétriques par rapport au plan médian  $xOy$  et parcourues par des courants de sens opposés.

On dispose également  $2 \times n_1$  spires du diamètre correspondant à la couche classique  $z$  (bobines 11, 12) et dont les positions axiales sont également des inconnues à déterminer. Ces spires obéissent aux mêmes propriétés de symétrie géométrique et d'antisymétrie pour les courants que celles des bobines 14, 15 incorporées dans des tubes 13.

Enfin, les courants dans les spires des bobines 14, 15 des tubes 13 et dans les spires classiques 11, 12 du même côté du plan  $xOy$  sont de sens opposés, produisant ainsi des champs de gradient  $z$  qui s'ajoutent dans la ROI alors que leurs composantes azimuthales du potentiel vecteur à l'extérieur se compensent.

Toutes ces spires étant parcourues par la même intensité nominale en valeur absolue et avec les sens précisés ci-dessus, il faut déterminer les nombres entiers  $n_1$  et  $n_2$  ainsi que les  $n_1 + n_2$  cotes axiales des spires pour produire un gradient  $z$  ayant une intensité donnée (par exemple 70 mT/m dans les exemples qui seront donnés plus loin) tout en possédant la qualité de linéarité et le niveau de blindage souhaités.

Compte tenu des symétries imposées pour la géométrie et les courants, les seuls termes non nuls du DHS dans le ROI sont les termes axiaux de degré impair, soit  $Z_1$  qui donne l'intensité du gradient et  $Z_3, Z_5, Z_7, \dots$  qui caractériseront la linéarité.

On remarquera que, outre les termes axiaux, les  $N_2$  tubes génèreront des coefficients  $X_n^m$  et  $Y_n^m$  avec  $n \geq N_2$  et donc négligeables si  $N_2$  n'est pas trop petit, comme expliqué dans les brevets relatifs aux gradients en tubes (voir par exemple le document WO 2005/029110 A2 ou le document WO 2007/048983 A2).

Les formules indiquées plus haut fournissent les expressions analytiques de ces  $Z_{2p+1}$  en fonction des  $n_1 + n_2$  cotes inconnues, dont celle de  $Z_1$ , c'est à dire le gradient. Une première étape pour obtenir une bonne linéarité est d'imposer la condition  $Z_3 = 0$  ce qui est pratiquement suffisant (voir les figures 1 et 1A) et si l'on veut faire encore mieux on imposera  $Z_3 = Z_5 = 0$  (voir les figures 2 et 2A).

Par ailleurs, les équations de Maxwell indiquent que l'origine des courants induits dans les enveloppes conductrices extérieures au système 8 de gradients est la variation temporelle de la composante azimutale du potentiel vecteur. Les formules mentionnées plus haut en fournissent également les expressions analytiques et pour réaliser le blindage, on imposera que le module de cette composante ne dépasse pas une valeur maximum fixée à un certain nombre de points de la région occupée par les enveloppes conductrices. Comme on a affaire à des fonctions continues et que le potentiel vecteur décroît avec la distance à ses sources, on imposera cette condition sur le module à un ensemble de points situés sur la génératrice d'un cylindre circulaire (par exemple 50 points régulièrement répartis entre la cote 0 et la cote 2m sur un cylindre de rayon 0,5m si le diamètre extérieur du système de gradients est 0,45m).

On a donc un problème d'optimisation non linéaire dont la fonction objectif à maximiser est  $Z_1$  avec des conditions non linéaires (égalités pour la linéarité, inégalités pour le blindage). Dès lors que l'on dispose d'expressions analytiques pour la fonction objectif et pour les contraintes, on peut utiliser les sous-programmes généraux des bibliothèques mathématiques comme par exemple les sous-programmes E04UCF ou E04WDF de la bibliothèque NAG qui est accessible librement en ligne avec les liens ci-dessous,

[http://www.nag.co.uk/numeric/fl/nagdoc\\_fl22/pdf/E04/e04ucf.pdf](http://www.nag.co.uk/numeric/fl/nagdoc_fl22/pdf/E04/e04ucf.pdf)

[http://www.nag.co.uk/numeric/fl/nagdoc\\_fl22/pdf/E04/e04wdf.pdf](http://www.nag.co.uk/numeric/fl/nagdoc_fl22/pdf/E04/e04wdf.pdf)

Les valeurs de  $n_1$  et de  $n_2$  doivent être données a priori et les valeurs finales résultent d'une succession d'essais de façon itérative.

Une fois les cotes obtenues, la résistance électrique et l'inductance de l'ensemble peuvent être calculées suivant les méthodes classiques de l'électromagnétisme.

On donnera maintenant ci-dessous différentes considérations concernant l'obtention de la configuration optimale pour les gradients x ou y.

La démarche est identique à celle décrite supra pour le gradient z quant à son principe. La partie classique nécessite une couche 16 pour le gradient x et une couche séparée 17 pour le gradient y, chaque couche 16, 17 étant constituée de quatre bobinages en selles de cheval 21 à 24, 25 à 28 respectivement par exemple suivant les documents de brevet susmentionnés (brevet EP 0 221 810 A1 ou WO 8903031 A, brevet US 4 617 516 A ou EP 0 140 259 B1).

La partie en tubes 29 utilise les mêmes bobinages 31 et 32 pour générer à la fois le gradient x et le gradient y par superposition des courants nécessaires à chacun d'eux. La partie du courant qui génère le gradient x est proportionnelle à  $\cos \varphi_0$  où  $\varphi_0$  est l'azimut du tube alimenté alors que la partie du courant qui génère le gradient y est proportionnelle à  $\sin \varphi_0$ .

Le gradient x total est égal au coefficient  $X_1^1$  du DHS alors que le gradient y total est égal à  $Y_1^1$ . La linéarité de la composante  $B_z$  du champ créé par chacun des gradients est obtenue en imposant les conditions  $X_3^1 = X_3^3 = 0$  pour le gradient x ainsi que  $X_5^1$  si l'on souhaite une linéarité meilleure, et les conditions similaires avec  $X \rightarrow Y$  pour le gradient y.

Alors que pour le gradient z la source excitatrice des courants induits est la composante azimutale du potentiel vecteur, on montre que dans le cas des gradients x ou y la source excitatrice principale est la composante de Fourier en  $\cos \varphi$  ou en  $\sin \varphi$  respectivement de la composante radiale  $B_\rho$  du champ magnétique généré au niveau des

enveloppes conductrices. C'est donc sur ces composantes de Fourier, dont on sait donner les expressions analytiques à partir des formules rappelées plus haut, que porteront les contraintes d'encadrement conduisant au blindage souhaité, suivant les mêmes modalités que celles imposées à la  
5 composante azimutale du potentiel vecteur pour le gradient z.

On notera que les sens des courants dans les selles de cheval 21 à 24, 25 à 28 et dans les tubes 29 sont imposés a priori pour que leurs contributions aux gradients s'ajoutent en même temps que leurs contributions à l'excitation des courants induits dans les enveloppes  
10 extérieures se retranchent, ce qui constitue l'une des caractéristiques essentielles de l'invention.

Le problème d'optimisation non linéaire est similaire à celui décrit plus haut pour le gradient z, la fonction objectif à maximiser étant maintenant  $X_1^1$  ou  $Y_1^1$  avec les conditions non linéaires (égalités pour la  
15 linéarité, inégalités pour le blindage) explicitées ci-dessus.

Les essais conduisant au nombre  $n_3$  ou  $n_4$  de spires de chaque selle de cheval 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 ou 28 et au nombre  $n_5$  de spires des bobines 31, 32 de chacun des tubes 29 montrent que les bobinages des tubes 29 de gradients x et y doivent être plus rapprochés du plan médian  
20 que ceux des tubes 13 de gradient z et qu'il faut donc les disposer sur plusieurs couches, par exemple deux ou trois.

Il faut également insister sur le fait que le choix de la technique des brevets EP 0 221 810 A1 ou WO 8903031 A pour les selles de cheval composées exclusivement, d'une part, d'arcs de spire circulaire dont on  
25 connaît les expressions analytiques des composantes du champ et du DHS et, d'autre part, de portions parallèles à Oz qui ne contribuent pas à la composante  $B_z$  du champ dans le ROI et dont on connaît également les expressions analytiques de leurs contributions à la composante radiale  $B_\rho$

à l'extérieur, est à préférer à d'autres techniques pour lesquelles on ne connaît pas ces expressions analytiques, ce qui constitue un handicap sérieux pour le processus d'optimisation.

Comme pour le gradient  $z$ , ce processus permet de déterminer  $n_3$ ,  
5  $n_4$  et les cotes correspondantes des spires des selles de cheval et des tubes dont les figures montrent des exemples. Il reste alors à calculer, par les méthodes classiques, la résistance électrique et l'inductance de chacun des ensembles  $x$  et  $y$ .

La présente invention vise à réaliser un générateur 8 de gradients  
10 qui malgré des conditions de mise en œuvre sévères, permette un fonctionnement amélioré.

L'invention est adaptée à des valeurs nominales de gradients de l'ordre de 70 mT/m obtenues en utilisant des amplificateurs qui, à titre d'exemple, peuvent être réalisés selon une technologie IGBT et peuvent  
15 présenter un fonctionnement avec une tension de 2 kV, une intensité de 625 A et une puissance moyenne de 70 kW.

Les bobinages doivent être réalisés de façon à présenter une résistance électrique minimale et également une inductance minimale, tout en étant installés dans un espace cylindrique circulaire annulaire  
20 réduit et en présentant une haute qualité géométrique pour produire une composante de champ magnétique  $B_z$  la plus linéaire possible. Les bobines de compensation servant de blindage pour limiter les courants induits dans les enveloppes conductrices extérieures doivent pouvoir limiter le bruit et les vibrations sans affaiblir les gradients de champ  
25 magnétique créés par les bobines de base.

Dans le système 8 de génération de gradients hybrides selon l'invention, qui met en œuvre des bobines de base constituées par des dispositifs de gradient « classiques » pour la génération des gradients de champ magnétique utiles et des bobines de compensation (blindage)

constituées par des bobines « en tubes », on résout un problème d'optimisation non linéaire avec des limites et des contraintes non linéaires par une méthode analytique et un développement en harmoniques sphériques solides réguliers de la composante du champ magnétique créé dans la région d'intérêt par des éléments de bobine (spire ou arc de spire),  
5 pour déterminer les moyens de création de gradients linéaires, et on utilise également une méthode analytique pour déterminer les caractéristiques des éléments de blindage et définir en un point de coordonnées cylindriques  $(\rho, \varphi, z)$  les composantes non nulles du  
10 potentiel vecteur et du champ par des séries de Fourier en  $\varphi$ , des séries de Fourier-Bessel en  $\rho$  et une transformation de Fourier en  $z$ .

Le système 8 de génération de gradients hybrides comprend pour la génération des gradients de base au moins deux nappes superficielles de courant par direction de gradient sur des cylindres circulaires d'axe Oz.

15 Chaque nappe superficielle comprenant les bobines cylindriques 11, 12 ou 111, 112 pour le gradient  $z$  ou les bobines en forme de selle de cheval 21 à 24 et 25 à 28 pour les gradients  $x$  et  $y$ , peut être formée de conducteurs filiformes de section circulaire ou rectangulaire ou le cas échéant de tubes cylindriques découpés.

20 Le système 8 de génération de gradients hybrides comprend pour la génération des gradients de compensation (blindage) des bobinages solénoïdaux dont les axes sont des génératrices équidistantes d'un cylindre d'axe Oz. On a ainsi des bobinages 14, 15 ou 114, 115 pour le gradient  $z$  et des bobinages 31, 32 pour les gradients  $x$  et  $y$ .

25 L'intensité nominale est imposée par l'amplificateur et détermine le choix de la section des canaux conducteurs compte tenu de la technique de refroidissement. Par exemple pour une intensité nominale de 625 A on peut choisir une section de conducteur de l'ordre de 40 mm<sup>2</sup>.

Comme on l'a déjà indiqué, la mise en œuvre de dispositifs de génération de gradients « en tubes » à la fois comme gradients sources et comme blindage, comme proposé par exemple dans le document WO 2007/048983 A2, présente une certaine efficacité, mais conduit à un  
5 encombrement trop important dans le sens radial, qui limite les applications pratiques.

Par ailleurs, la mise en œuvre d'un blindage à l'aide de dispositifs de gradient « classiques » (bobines en selle de cheval ou bobines solénoïdales centrées sur l'axe Oz) crée des courants induits qui  
10 affaiblissent les gradients sources créés par des dispositifs de gradient « classiques » ou même du type « en tubes » disposés en couronne. En effet, la couche secondaire extérieure nécessaire au blindage diminue le gradient généré par la couche primaire intérieure et la valeur souhaitée du gradient ne peut être obtenue qu'en sacrifiant la linéarité.

15 Au contraire, dans le cas d'un système 8 de génération de gradients hybrides selon l'invention, on utilise pour la production des gradients sources des dispositifs de gradient classiques qui occupent peu d'espace dans le sens radial, et les dispositifs de gradient « en tubes » utilisés pour le blindage extérieur produisent des courants induits qui par nature, du  
20 fait de la conception des dispositifs de gradients « en tubes », renforcent les gradients sources. On dispose ainsi d'un système 8 de génération de gradients qui est à la fois compact et efficace permettant de conserver une excellente linéarité.

Les figures 11 et 12 montrent, dans des vues développées en plan,  
25 des exemples de réalisation de bobinages 41, 42 pouvant constituer les bobines 21 à 28 en forme de selle de cheval. Sur les figures 11 et 12, on a représenté des spires concentriques non raccordées, telles qu'elles peuvent se présenter dans des calculs intermédiaires lors de la détermination de ces bobines. En pratique, on réalise des transitions inter-

spires 51 à 56 entre les différentes spires par exemple selon l'un des exemples donnés sur les figures 13 à 18.

Dans le cas de la figure 13, les transitions 51 sont étalées, le cas échéant sur toute la longueur dans une configuration proche d'une hélice.

5 Dans le cas des figures 14 et 15, on a des transitions 52 et 53 du type orthocyclique.

Les figures 16 à 18 montrent de façon agrandie des exemples de transitions inter-spires 54 à 56, dans lesquelles la connexion s'effectue sur la même génératrice, ce qui peut s'avérer avantageux d'un point de vue  
10 mécanique et pour la réalisation des supports. On peut noter que la réduction de la largeur du canal conducteur dans la transition peut être compensée par une surépaisseur du côté intérieur.

On donnera ci-dessous à titre d'exemple, les caractéristiques d'un dispositif de génération de gradient  $z$  hybride selon l'invention mettant en  
15 œuvre des bobines 11, 12 et 14, 15 des figures 1 et 1A, alimentées par un amplificateur à technologie IGBT de 2 kV crête et 625 A en continu:

Gradient  $z$  avec  $Z_3 = 0$  :  $G_z = 71,000$  mT/m

Linéarité : -0,54% @ 0,1 m

-2,60% @ 0,15 m

20 Potentiel vecteur qui génère les courants de Foucault vers l'extérieur :

$A_\varphi \approx 9$   $\mu$ T.m @ 0,5 m

Résistance :  $R = 80$  m $\Omega$

Puissance :  $P = 31,328$  kW

Inductance :  $L = 0,430$  mH

25 Temps de commutation :  $\Delta = 0,134$  ms

On constate ici que pour une valeur nominale d'intensité du gradient  $G_z$  un peu plus élevée qu'avec des dispositifs de l'art antérieur l'ensemble des autres valeurs sont plus réduites, ce qui dénote une linéarité améliorée, une limitation des courants induits, une résistance et

une inductance réduites, un temps de commutation également réduit, pour un ensemble d'éléments qui occupent eux-mêmes un espace réduit, les bobines 11, 12 et 14, 15 pouvant par exemple être disposées dans un espace annulaire cylindrique de diamètre intérieur voisin de 60 cm et de diamètre extérieur voisin de 90 cm, comme on peut le voir sur les figures 1 et 1A. De la même façon, dans le mode de réalisation des figures 2 et 2A, les bobines 111, 112, 114 et 115 peuvent être disposées dans un espace annulaire cylindrique de diamètre intérieur voisin de 60 cm et de diamètre extérieur voisin de 90 cm.

10 Dans l'exemple donné ci-dessus qui correspond aux figures 1 et 1A, la contribution des bobines 11, 12 et 14, 15 au gradient  $z$  est respectivement la suivante :

Bobines 11 et 12 : 58,461 mT/m

8 paires de bobines 14 et 15 placées dans 8 tubes 13 : 12,539 mT/m

15 On voit que pour la production du gradient  $z$  total de 71 mT/m, si la part des bobines 11 et 12 est prépondérante, l'ensemble des paires de bobines 14, 15 contribue bien à renforcer ce gradient et non à l'affaiblir, bien que ces paires de bobines 14, 15 jouent un rôle de blindage réduisant les courants de Foucault induits vers les enveloppes extérieures.

20 L'invention concerne également une machine d'imagerie par résonance magnétique nucléaire à gradients améliorés, comprenant un tunnel 4 d'axe Oz et de section essentiellement circulaire définissant un volume d'intérêt ZI, un premier espace annulaire cylindrique 1 entourant le volume d'intérêt ZI et comprenant un système 8 de génération de gradients de champ magnétique tel que décrit plus haut pour créer un gradient de champ magnétique dans le volume d'intérêt ZI, un deuxième espace annulaire cylindrique 2 extérieur formant cryostat entourant le premier espace annulaire cylindrique 1 et comprenant un dispositif d'aimant supraconducteur pour générer une composante de champ

25

magnétique homogène  $B_z$  selon l'axe  $Oz$  dans le volume d'intérêt  $ZI$ , un dispositif 3 d'antennes d'émission radiofréquence disposé à l'intérieur du tunnel 4 ou au voisinage de celui-ci dans le premier espace annulaire cylindrique 1 et des dispositifs 6 d'alimentation électrique du système 8 de  
5 génération de gradients et du dispositif 3 d'antennes (voir la figure 19).

L'invention a encore pour objet un procédé de réalisation d'un système de génération de gradients de champ magnétique disposé dans un premier espace annulaire cylindrique 1 autour d'un tunnel 4 d'axe  $Oz$  et de section essentiellement circulaire définissant un volume d'intérêt  $ZI$   
10 dans une machine 7 d'imagerie par résonance magnétique nucléaire comprenant un deuxième espace annulaire cylindrique 2 extérieur formant cryostat entourant le premier espace annulaire cylindrique 1 et comprenant un dispositif d'aimant supraconducteur pour générer une composante de champ magnétique homogène  $B_z$  selon l'axe  $Oz$  dans le  
15 volume d'intérêt  $ZI$ , pour créer un gradient de champ magnétique dans le volume d'intérêt  $ZI$ .

Ce procédé comprend les étapes suivantes :

- former à l'intérieur du premier espace annulaire cylindrique 1, des première et deuxième bobines solénoïdales 11, 12 de gradient  $z$   
20 comprenant chacune une même pluralité  $n_1$  de spires identiques d'axe  $Oz$  et de diamètre inférieur au diamètre externe du premier espace annulaire cylindrique 1, les spires de la deuxième bobine 12 étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la première bobine 11 pour produire une première  
25 composante de gradient de champ  $z$  dans une direction axiale  $z$  parallèle à l'axe  $Oz$  ;
- former un ensemble de  $N_1$  premiers tubes 13 non jointifs identiques d'axes parallèles à l'axe  $Oz$  et disposés dans un sous-espace annulaire cylindrique 9 situé à l'intérieur du premier espace

- annulaire cylindrique 1 à l'extérieur des première et deuxième bobines 11, 12 de gradient  $z$ , chacun des  $N_1$  premiers tubes 13 comprenant des troisième et quatrième bobines solénoïdales 14, 15 de gradient  $z$  symétriques par rapport à un plan  $xOy$  perpendiculaire à l'axe  $Oz$ , comprenant chacune une même pluralité  $n_2$  de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant 13 et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube 13, les spires de la quatrième bobine 15 disposée en regard de la deuxième bobine 12 étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la deuxième bobine 12 et à celui parcourant les spires de la troisième bobine 14 elle-même disposée en regard de la première bobine 11 pour produire une deuxième composante de gradient de champ  $z$  dans la direction axiale  $z$  parallèle à l'axe  $Oz$  ;
- 5
- 10
- 15
- former un ensemble de cinquième, sixième, septième et huitième bobines de gradient  $x$  ayant une configuration en forme de selle de cheval avec chacune un nombre  $n_3$  de spires, les cinquième, sixième, septième et huitième bobines 21, 22, 23, 24 de gradient  $x$  étant disposées au voisinage des première et deuxième bobines solénoïdales 11, 12 de gradient  $z$ , à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe  $Oz$  pour produire une première composante de gradient de champ  $x$  dans une première direction radiale  $x$  de la machine perpendiculaire à l'axe  $Oz$  ;
- 20
- 25
- former un ensemble de neuvième, dixième, onzième et douzième bobines 25, 26, 27, 28 de gradient  $y$  ayant une configuration en forme de selle de cheval avec chacune un nombre  $n_4$  de spires, les neuvième, dixième, onzième et douzième bobines 25, 26, 27, 28 de gradient  $y$  étant disposées au voisinage des première et deuxième

- bobines solénoïdales 11, 12 de gradient  $z$ , à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe  $Oz$ , en superposition respectivement aux cinquième, sixième, septième et huitième bobines 21, 22, 23, 24 de gradient  $x$  mais
- 5 décalées de  $90^\circ$  par rapport à celles-ci pour produire une première composante de gradient de champ  $y$  dans une deuxième direction radiale  $y$  de la machine également perpendiculaire à l'axe  $Oz$ , la première direction  $x$  étant perpendiculaire à la deuxième direction  $y$ ;
- 10 - former un ensemble de  $N_2$  deuxièmes tubes 29 non jointifs identiques d'axes parallèles à l'axe  $Oz$  et situés dans le sous-espace annulaire cylindrique 9 situé à l'intérieur du premier espace annulaire cylindrique 1 à l'extérieur des première et deuxième bobines 11, 12 de gradient  $z$ , en étant intercalés entre les premiers
- 15 tubes 13, chacun des  $N_2$  deuxièmes tubes 29 comprenant des treizième et quatorzième bobines solénoïdales 31, 32 de gradient  $x$  et  $y$  symétriques par rapport à un plan  $xOy$  perpendiculaire à l'axe  $Oz$ , comprenant chacune une même pluralité  $n_5$  de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube
- 20 correspondant 29 et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube 29, les spires de la quatorzième bobine 32 disposée en regard de la deuxième bobine 12 étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la deuxième bobine 12 et à celui parcourant les spires de la treizième
- 25 bobine 31 elle-même disposée en regard de la première bobine 11 pour produire une deuxième composante à la fois de gradient de champ  $x$  et de gradient de champ  $y$ .

Selon ce procédé, on détermine les caractéristiques de l'ensemble des bobines solénoïdales à l'aide du développement en harmoniques

sphériques solides réguliers de la composante  $B_z$  du champ magnétique créé dans la zone d'intérêt par chaque spire ou arc de spire d'une bobine solénoïdale, en fonction de la puissance disponible de l'alimentation électrique des bobines, du diamètre externe du tunnel 4 définissant la zone d'intérêt ZI et du diamètre interne du deuxième espace annulaire cylindrique 2 extérieur comprenant le dispositif d'aimant supraconducteur.

## REVENDEICATIONS

1. Système de génération de gradients de champ magnétique, disposé autour d'un volume d'intérêt (ZI) d'axe Oz dans une machine (7) d'imagerie par résonance nucléaire, caractérisé en ce qu'il comprend au moins des première et deuxième bobines (11, 12) solénoïdales de gradient z, d'axe Oz parcourues par des courants de sens opposés; un ensemble de premiers tubes (13) identiques de gradient z d'axes parallèles à l'axe Oz comprenant chacun au moins des troisième et quatrième bobines (14, 15) solénoïdales parcourues par des courants de sens opposés et disposés en couronne à l'extérieur des premières et deuxièmes bobines (11, 12) de gradient z ; au moins des cinquième à huitième bobines (21, 22, 23, 24) de gradient x en forme de selle de cheval et des neuvième à douzième bobines (25, 26, 27, 28) de gradient y en forme de selle de cheval disposées autour des première et deuxième bobines (11, 12) de gradient z; un ensemble de deuxièmes tubes (29) identiques de gradients x et y d'axes parallèles à l'axe Oz et situés en couronne à l'extérieur des première et deuxième bobines (11, 12) de gradient z, en étant intercalés entre les premiers tubes (13) de gradient z sur la même couronne, chacun des deuxièmes tubes (29) de gradient x et y comprenant au moins des treizième et quatorzième bobines (31, 32) solénoïdales parcourues par des courants de sens opposés, les directions x et y étant orthogonales entre elles et orthogonales à l'axe Oz.
2. Système de génération de gradients de champ magnétique selon la revendication 1, disposé dans un premier espace annulaire cylindrique (1) autour d'un tunnel (4) d'axe Oz et de section essentiellement circulaire définissant un volume d'intérêt (ZI) dans une machine (7) d'imagerie par résonance magnétique nucléaire, pour créer un gradient de champ

magnétique dans ledit volume d'intérêt (ZI), caractérisé en ce que le système (8) de génération de gradients comprend, à l'intérieur du premier espace annulaire cylindrique (1), des première et deuxième bobines solénoïdales (11, 12) de gradient z comprenant chacune une même pluralité  $n_1$  de spires identiques d'axe Oz et de diamètre inférieur au diamètre externe du premier espace annulaire cylindrique (1), les spires de la deuxième bobine (12) étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la première bobine (11) pour produire une première composante de gradient de champ z dans une direction axiale z parallèle à l'axe Oz ; un ensemble de  $N_1$  premiers tubes (13) non jointifs identiques d'axes parallèles à l'axe Oz et disposés dans un sous-espace annulaire cylindrique (9) situé à l'intérieur dudit premier espace annulaire cylindrique (1) à l'extérieur desdites première et deuxième bobines (11, 12) de gradient z, chacun des  $N_1$  premiers tubes (13) comprenant des troisième et quatrième bobines solénoïdales (14, 15) de gradient z symétriques par rapport à un plan xOy perpendiculaire à l'axe Oz, comprenant chacune une même pluralité  $n_2$  de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant (13) et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube (13), les spires de la quatrième bobine (15) disposée en regard de la deuxième bobine (12) étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la deuxième bobine (12) et à celui parcourant les spires de la troisième bobine (14) elle-même disposée en regard de la première bobine (11) pour produire une deuxième composante de gradient de champ z dans ladite direction axiale z parallèle à l'axe Oz ; un ensemble de cinquième, sixième, septième et huitième bobines de gradient x ayant une configuration en forme de selle de cheval avec chacune un nombre  $n_3$  de spires, les cinquième, sixième, septième et huitième bobines (21, 22, 23, 24) de gradient x étant disposées au

voisinage des première et deuxième bobines solénoïdales (11, 12) de gradient z, à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe Oz pour produire une première composante de gradient de champ x dans une première direction radiale x de la machine

5 perpendiculaire à l'axe Oz ; un ensemble de neuvième, dixième, onzième et douzième bobines (25, 26, 27, 28) de gradient y ayant une configuration en forme de selle de cheval avec chacune un nombre  $n_4$  de spires, les neuvième, dixième, onzième et douzième bobines (25, 26, 27, 28) de gradient y étant disposées au voisinage des première et deuxième

10 bobines solénoïdales (11, 12) de gradient z, à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe Oz, en superposition respectivement aux cinquième, sixième, septième et huitième bobines (21, 22, 23, 24) de gradient x mais décalées de  $90^\circ$  par rapport à celles-ci pour produire une première composante de gradient de champ y dans une

15 deuxième direction radiale y de la machine également perpendiculaire à l'axe Oz, la première direction x étant perpendiculaire à la deuxième direction y; un ensemble de  $N_2$  deuxièmes tubes (29) non jointifs identiques d'axes parallèles à l'axe Oz et situés dans ledit sous-espace annulaire cylindrique (9) situé à l'intérieur dudit premier espace annulaire

20 cylindrique (1) à l'extérieur desdites première et deuxième bobines (11, 12) de gradient z, en étant intercalés entre lesdits premiers tubes (13), chacun des  $N_2$  deuxièmes tubes (29) comprenant des treizième et quatorzième bobines solénoïdales (31, 32) de gradient x et y symétriques par rapport à un plan xOy perpendiculaire à l'axe Oz, comprenant chacune

25 une même pluralité  $n_5$  de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant (29) et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube (29), les spires de la quatorzième bobine (32) disposée en regard de la deuxième bobine (12) étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les

spires de la deuxième bobine (12) et à celui parcourant les spires de la treizième bobine (31) elle-même disposée en regard de la première bobine (11) pour produire une deuxième composante à la fois de gradient de champ x et de gradient de champ y.

5

3. Système de génération de gradients selon la revendication 1 ou la revendication 2, caractérisé en ce que les première et deuxième bobines solénoïdales (11, 12) de gradient z et les troisième et quatrième bobines solénoïdales (14, 15) de gradient z sont monocouches.

10

4. Système de génération de gradients selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que les cinquième, sixième, septième et huitième bobines (21, 22, 23, 24) de gradient x et les neuvième, dixième, onzième et douzième bobines (25, 26, 27, 28) de gradient y sont monocouches tandis que les treizième et quatorzième bobines solénoïdales (31, 32) de gradient x et y sont bicouches.

15

5. Système de génération de gradients selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les N2 deuxièmes tubes (29) sont plus courts que les N1 premiers tubes (13).

20

6. Système de génération de gradients selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce qu'il comprend dans le sous-espace cylindrique (9) une couronne de 12, 16 ou 24 tubes comprenant lesdits deuxièmes tubes (29) alternant avec lesdits premiers tubes (13).

25

7. Machine d'imagerie par résonance magnétique nucléaire à gradients améliorés, comprenant un tunnel (4) d'axe Oz et de section essentiellement circulaire définissant un volume d'intérêt (ZI), un premier

espace annulaire cylindrique (1) entourant ledit volume d'intérêt (ZI) et comprenant un système (8) de génération de gradients de champ magnétique pour créer un gradient de champ magnétique dans ledit volume d'intérêt (ZI), un deuxième espace annulaire cylindrique (2) extérieur formant cryostat entourant ledit premier espace annulaire cylindrique (1) et comprenant un dispositif d'aimant supraconducteur pour générer une composante de champ magnétique homogène  $B_z$  selon ledit axe  $Oz$  dans ledit volume d'intérêt (ZI), un dispositif (3) d'antennes d'émission radiofréquence disposé à l'intérieur dudit tunnel (4) ou au voisinage de celui-ci dans le premier espace annulaire cylindrique (1) et des dispositifs (6) d'alimentation électrique du système (8) de génération de gradients et du dispositif (3) d'antennes, caractérisée en ce que le système (8) de génération de gradients est réalisé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6.

15

8. Machine selon la revendication 7, caractérisée en ce que le tunnel (4) présente un diamètre de 55 cm, le deuxième espace annulaire cylindrique (2) extérieur présente un diamètre interne de 90 cm, et ledit sous-espace annulaire cylindrique (9) présente un diamètre intérieur de 60 cm.

20

9. Procédé de réalisation d'un système de génération de gradients de champ magnétique, disposé autour d'un volume d'intérêt (ZI) d'axe  $Oz$  dans une machine (7) d'imagerie par résonance nucléaire, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

25

- former au moins des première et deuxième bobines (11, 12) solénoïdales de gradient  $z$ , d'axe  $Oz$  parcourues par des courants de sens opposés ;

- 5 - former un ensemble de premiers tubes (13) identiques de gradient z d'axes parallèles à l'axe Oz comprenant chacun au moins des troisième et quatrième bobines (14, 15) solénoïdales parcourues par des courants de sens opposés et disposés en couronne à l'extérieur des premières et deuxièmes bobines (11, 12) de gradient z ;
- former au moins des cinquième à huitième bobines (21, 22, 23, 24) de gradient x en forme de selle de cheval disposées autour des première et deuxième bobines (11, 12) de gradient z;
- 10 - former au moins des neuvième à douzième bobines (25, 26, 27, 28) de gradient y en forme de selle de cheval disposées autour des première et deuxième bobines (11, 12) de gradient z;
- former un ensemble de deuxièmes tubes (29) identiques de gradients x et y d'axes parallèles à l'axe Oz et situés en couronne à l'extérieur des premières et deuxièmes bobines (11, 12) de gradient z, en étant intercalés entre les premiers tubes (13) de gradient z sur la même couronne, chacun des deuxièmes tubes (29) de gradient x et y comprenant au moins des treizième et quatorzième bobines (31, 32) sinusoïdales parcourues par des courants de sens opposés, les directions x et y étant orthogonales entre elles et orthogonales à l'axe z ; et-déterminer les caractéristiques de l'ensemble des bobines solénoïdales à l'aide du développement en harmoniques sphériques solides réguliers de la composante Bz du champ magnétique créé dans la zone d'intérêt (ZI) par chaque spire ou arc de spire d'une bobine solénoïdale, en fonction de la puissance disponible de l'alimentation électrique des bobines, du diamètre externe du tunnel (4) définissant la zone d'intérêt (ZI) et du diamètre interne d'un deuxième espace annulaire cylindrique (2) extérieur comprenant un dispositif d'aimant supraconducteur.
- 15
- 20
- 25

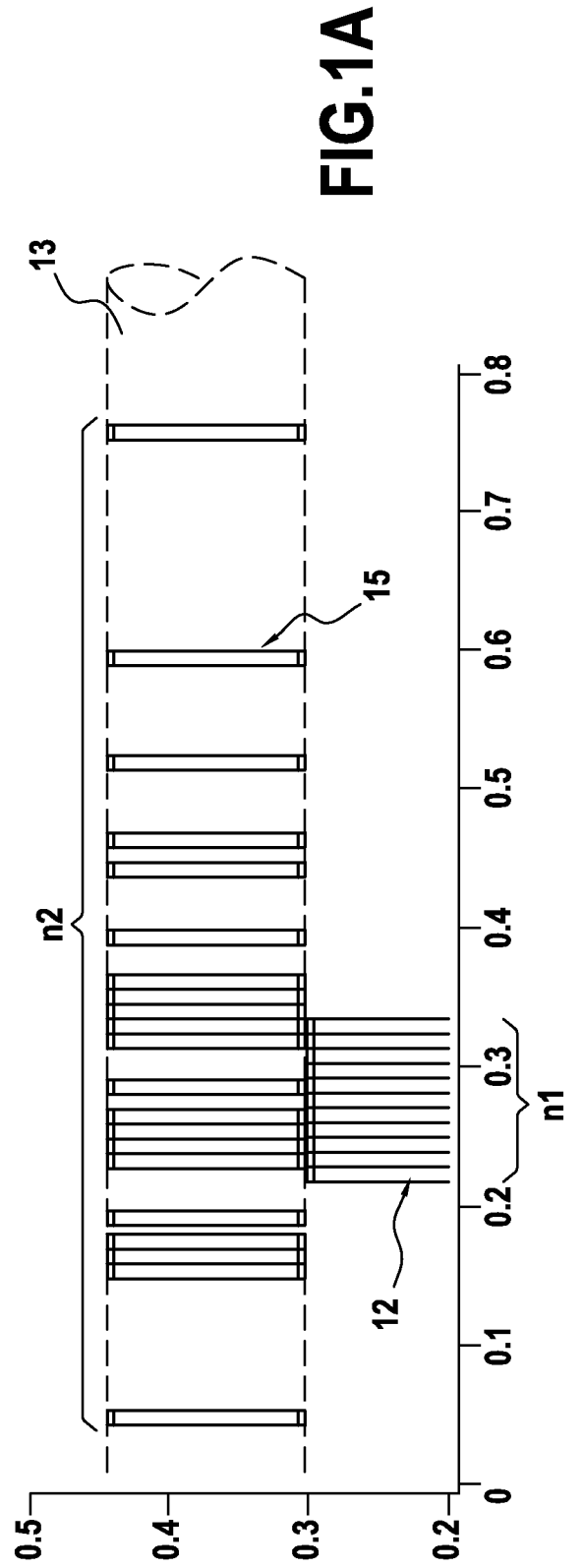
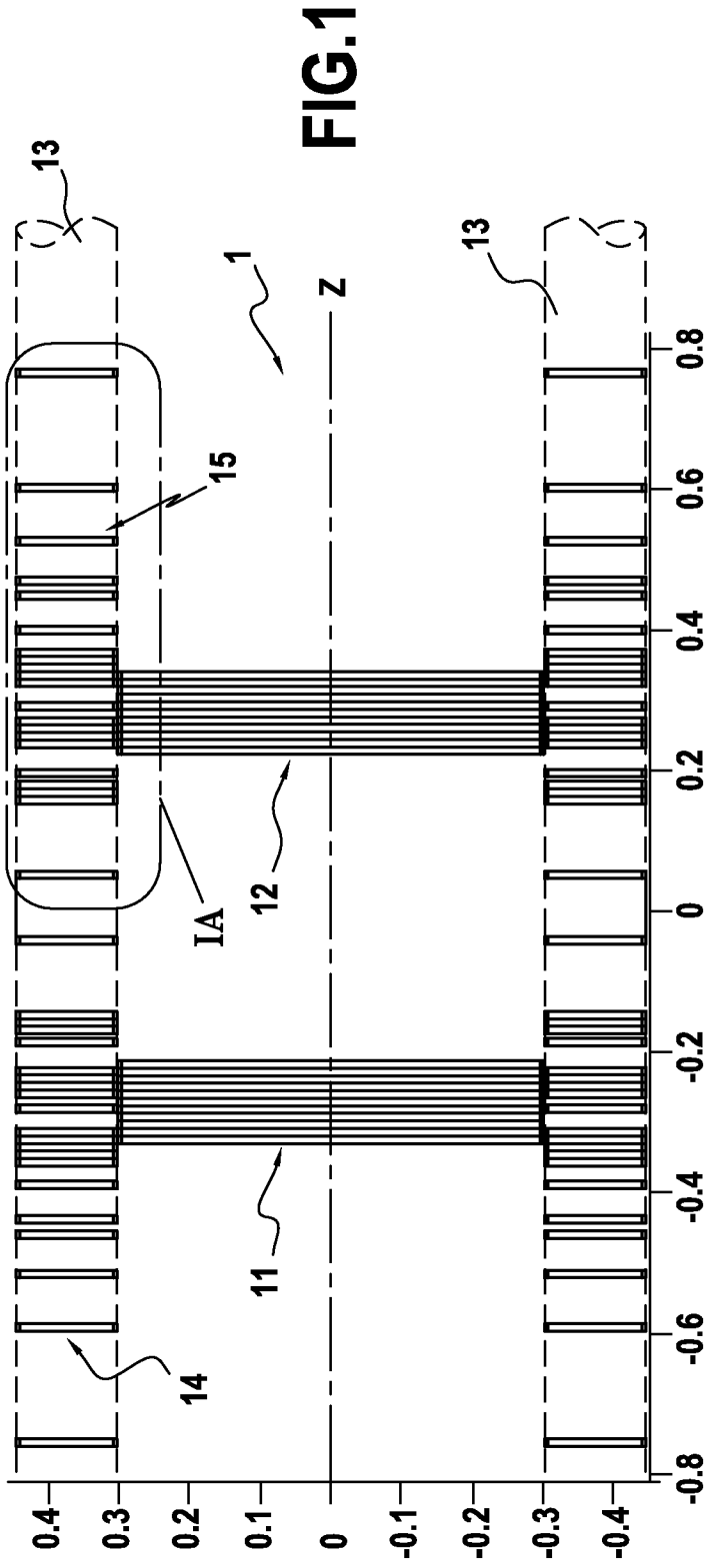
10. Procédé selon la revendication 9, de réalisation d'un système de  
génération de gradients de champ magnétique disposé dans un premier  
espace annulaire cylindrique (1) autour d'un tunnel (4) d'axe Oz et de  
5 section essentiellement circulaire définissant un volume d'intérêt (ZI) dans  
une machine (7) d'imagerie par résonance magnétique nucléaire  
comprenant un deuxième espace annulaire cylindrique (2) extérieur  
formant cryostat entourant ledit premier espace annulaire cylindrique (1)  
et comprenant un dispositif d'aimant supraconducteur pour générer une  
10 composante de champ magnétique homogène Bz selon ledit axe Oz dans  
ledit volume d'intérêt (ZI), , pour créer un gradient de champ magnétique  
dans ledit volume d'intérêt (ZI), caractérisé en ce qu'il comprend les  
étapes suivantes :

- 15 - former à l'intérieur dudit premier espace annulaire cylindrique (1),  
des première et deuxième bobines solénoïdales (11, 12) de  
gradient z comprenant chacune une même pluralité n1 de spires  
identiques d'axe Oz et de diamètre inférieur au diamètre externe du  
premier espace annulaire cylindrique (1), les spires de la deuxième  
bobine (12) étant parcourues par un courant de sens opposé à celui  
20 parcourant les spires de la première bobine (11) pour produire une  
première composante de gradient de champ z dans une direction  
axiale z parallèle à l'axe Oz ;
- former un ensemble de N1 premiers tubes (13) non jointifs  
identiques d'axes parallèles à l'axe Oz et disposés dans un sous-  
25 espace annulaire cylindrique (9) situé à l'intérieur dudit premier  
espace annulaire cylindrique (1) à l'extérieur desdites première et  
deuxième bobines (11, 12) de gradient z, chacun des N1 premiers  
tubes (13) comprenant des troisième et quatrième bobines  
solénoïdales (14, 15) de gradient z symétriques par rapport à un

- plan xOy perpendiculaire à l'axe Oz, comprenant chacune une même pluralité  $n_2$  de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant (13) et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube (13), les spires de la quatrième bobine (15) disposée en regard de la deuxième bobine (12) étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la deuxième bobine (12) et à celui parcourant les spires de la troisième bobine (14) elle-même disposée en regard de la première bobine (11) pour produire une deuxième composante de gradient de champ z dans ladite direction axiale z parallèle à l'axe Oz ;
- 5
- 10
- former un ensemble de cinquième, sixième, septième et huitième bobines de gradient x ayant une configuration en forme de selle de cheval avec chacune un nombre  $n_3$  de spires, les cinquième, sixième, septième et huitième bobines (21, 22, 23, 24) de gradient x étant disposées au voisinage des première et deuxième bobines solénoïdales (11, 12) de gradient z, à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe Oz pour produire une première composante de gradient de champ x dans une première direction radiale x de la machine perpendiculaire à l'axe Oz ;
- 15
- 20
- former un ensemble de neuvième, dixième, onzième et douzième bobines (25, 26, 27, 28) de gradient y ayant une configuration en forme de selle de cheval avec chacune un nombre  $n_4$  de spires, les neuvième, dixième, onzième et douzième bobines (25, 26, 27, 28) de gradient y étant disposées au voisinage des première et deuxième bobines solénoïdales (11, 12) de gradient z, à des positions symétriques radialement et longitudinalement par rapport à l'axe Oz, en superposition respectivement aux cinquième,
- 25

- sixième, septième et huitième bobines (21, 22, 23, 24) de gradient x mais décalées de  $90^\circ$  par rapport à celles-ci pour produire une première composante de gradient de champ y dans une deuxième direction radiale y de la machine également perpendiculaire à l'axe Oz, la première direction x étant perpendiculaire à la deuxième direction y;
- 5
- former un ensemble de N2 deuxièmes tubes (29) non jointifs identiques d'axes parallèles à l'axe Oz et situés dans ledit sous-espace annulaire cylindrique (9) situé à l'intérieur dudit premier
- 10
- espace annulaire cylindrique (1) à l'extérieur desdites première et deuxième bobines (11, 12) de gradient z, en étant intercalés entre lesdits premiers tubes (13), chacun des N2 deuxièmes tubes (29) comprenant des treizième et quatorzième bobines solénoïdales (31, 32) de gradient x et y symétriques par rapport à un plan xOy
- 15
- perpendiculaire à l'axe Oz, comprenant chacune une même pluralité n5 de spires identiques de diamètre inférieur au diamètre interne du tube correspondant (29) et réparties dans des positions prédéterminées selon l'axe de ce tube (29), les spires de la quatorzième bobine (32) disposée en regard de la deuxième
- 20
- bobine (12) étant parcourues par un courant de sens opposé à celui parcourant les spires de la deuxième bobine (12) et à celui parcourant les spires de la treizième bobine (31) elle-même disposée en regard de la première bobine (11) pour produire une deuxième composante à la fois de gradient de champ x et de
- 25
- gradient de champ y ; et
- déterminer les caractéristiques de l'ensemble des bobines solénoïdales à l'aide du développement en harmoniques sphériques solides réguliers de la composante  $B_z$  du champ magnétique créé dans la zone d'intérêt par chaque spire ou arc de spire d'une bobine

5 solénoïdale, en fonction de la puissance disponible de l'alimentation électrique des bobines, du diamètre externe du tunnel (4) définissant la zone d'intérêt (ZI) et du diamètre interne dudit deuxième espace annulaire cylindrique (2) extérieur comprenant le dispositif d'aimant supraconducteur.



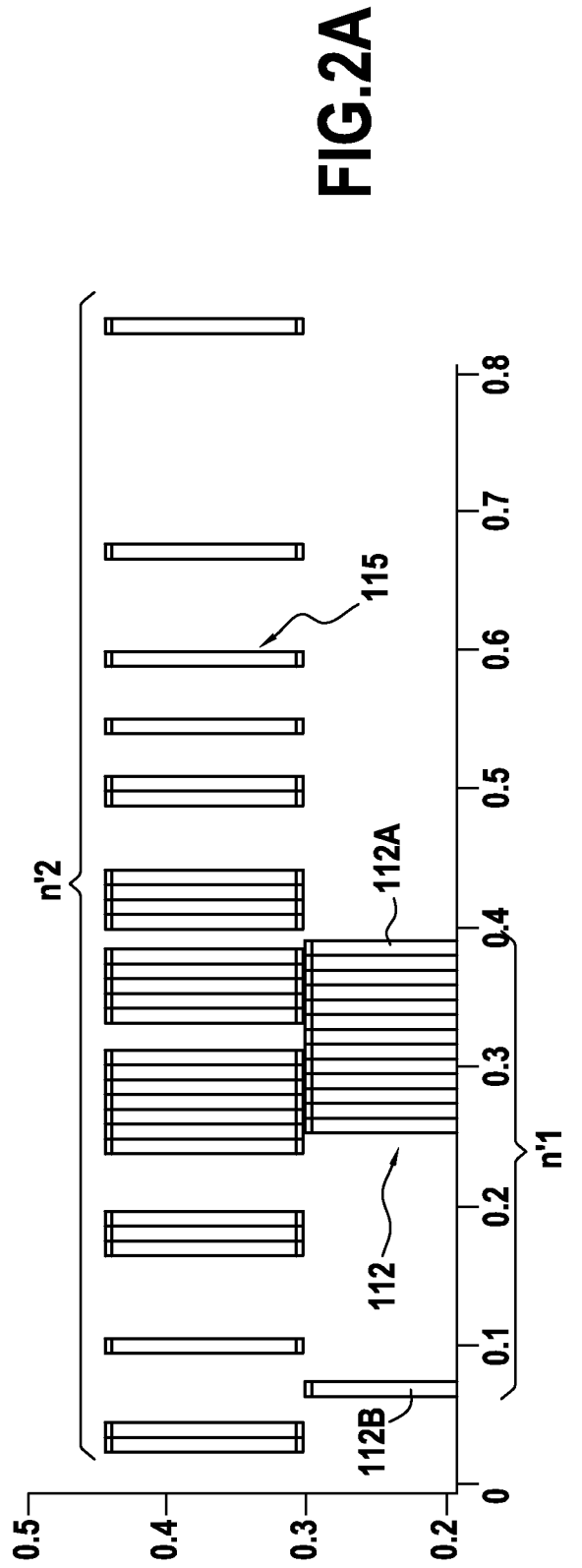
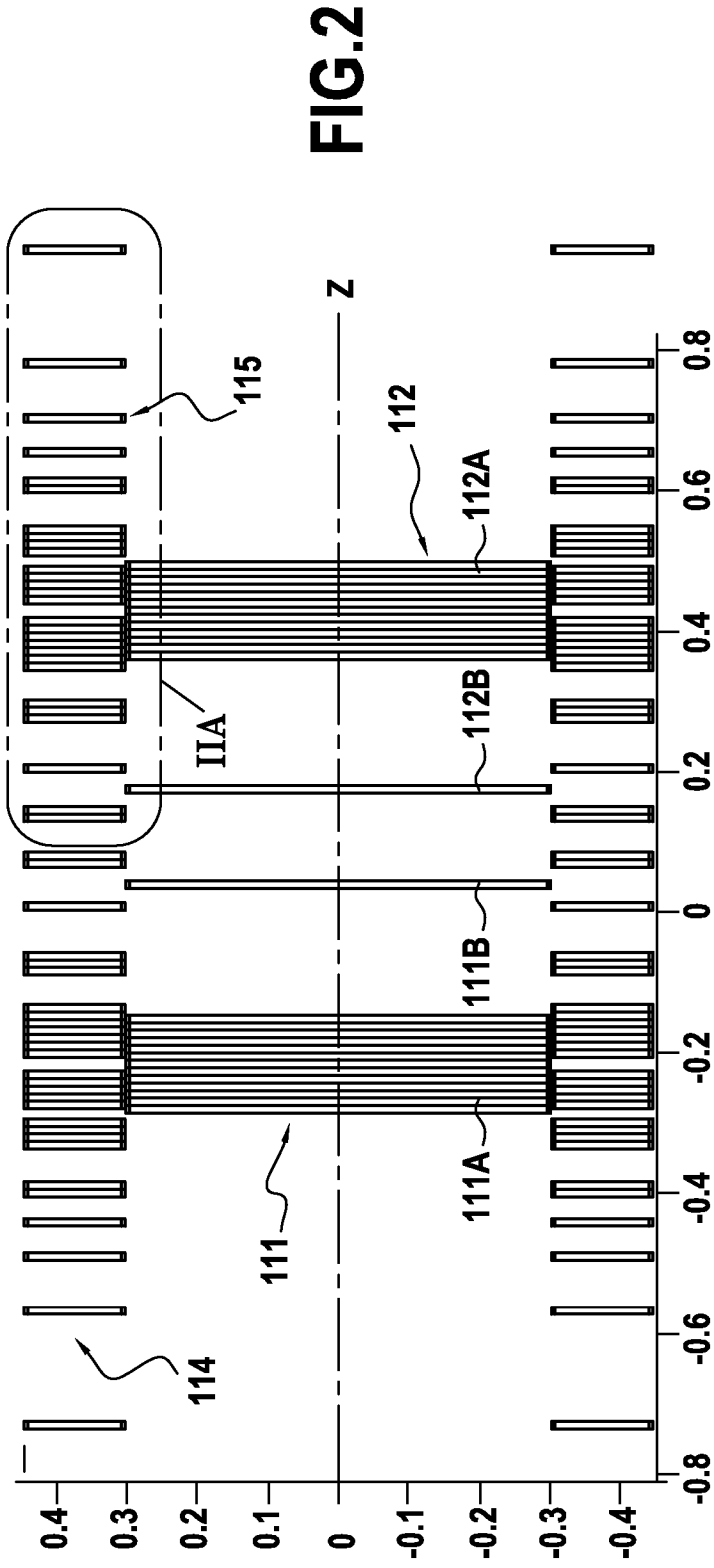


FIG.3

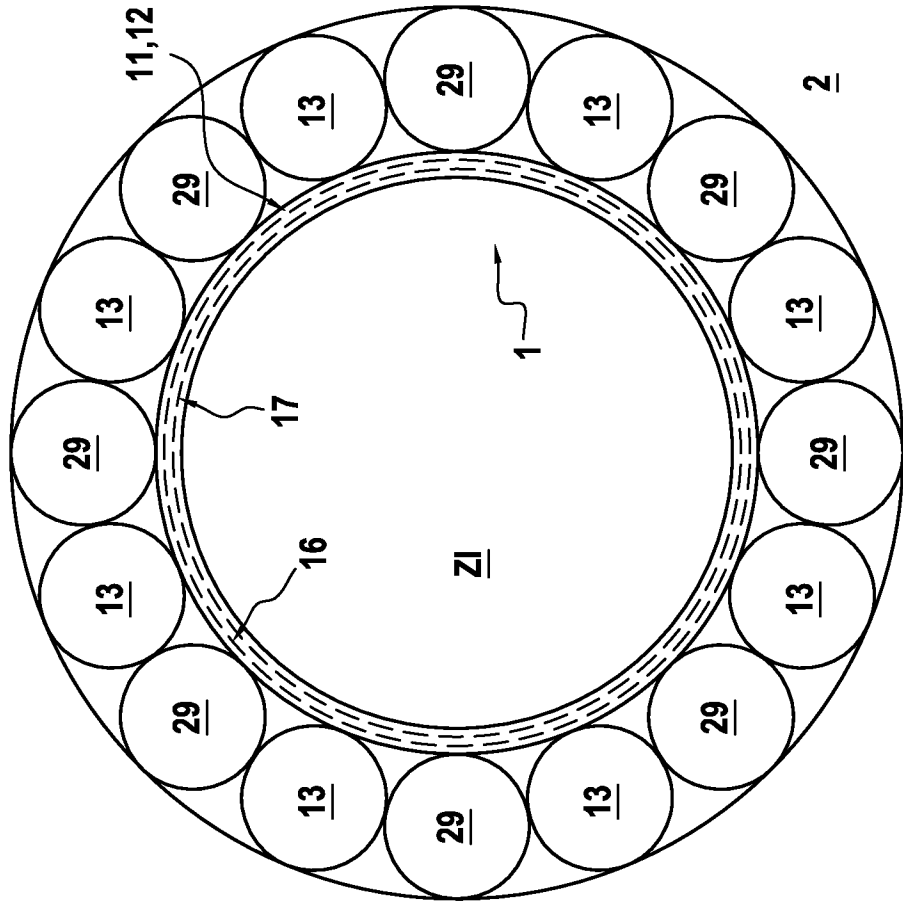
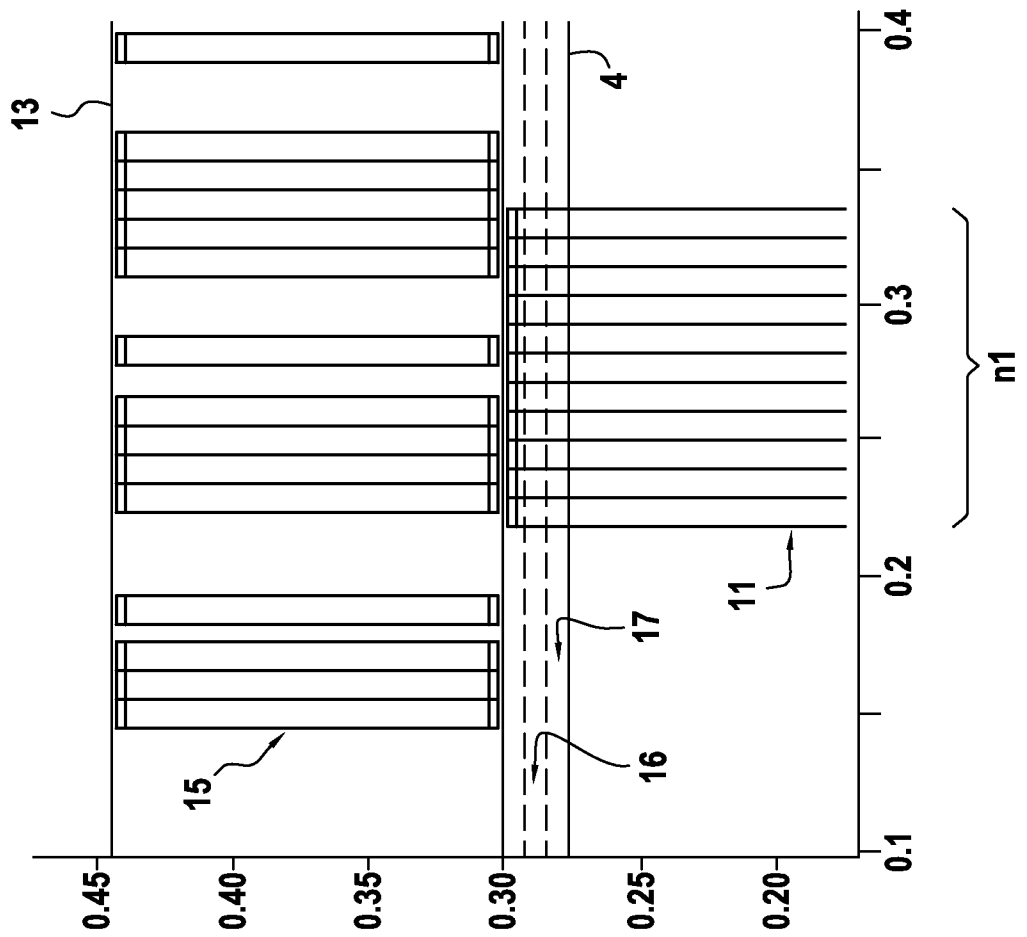


FIG.4

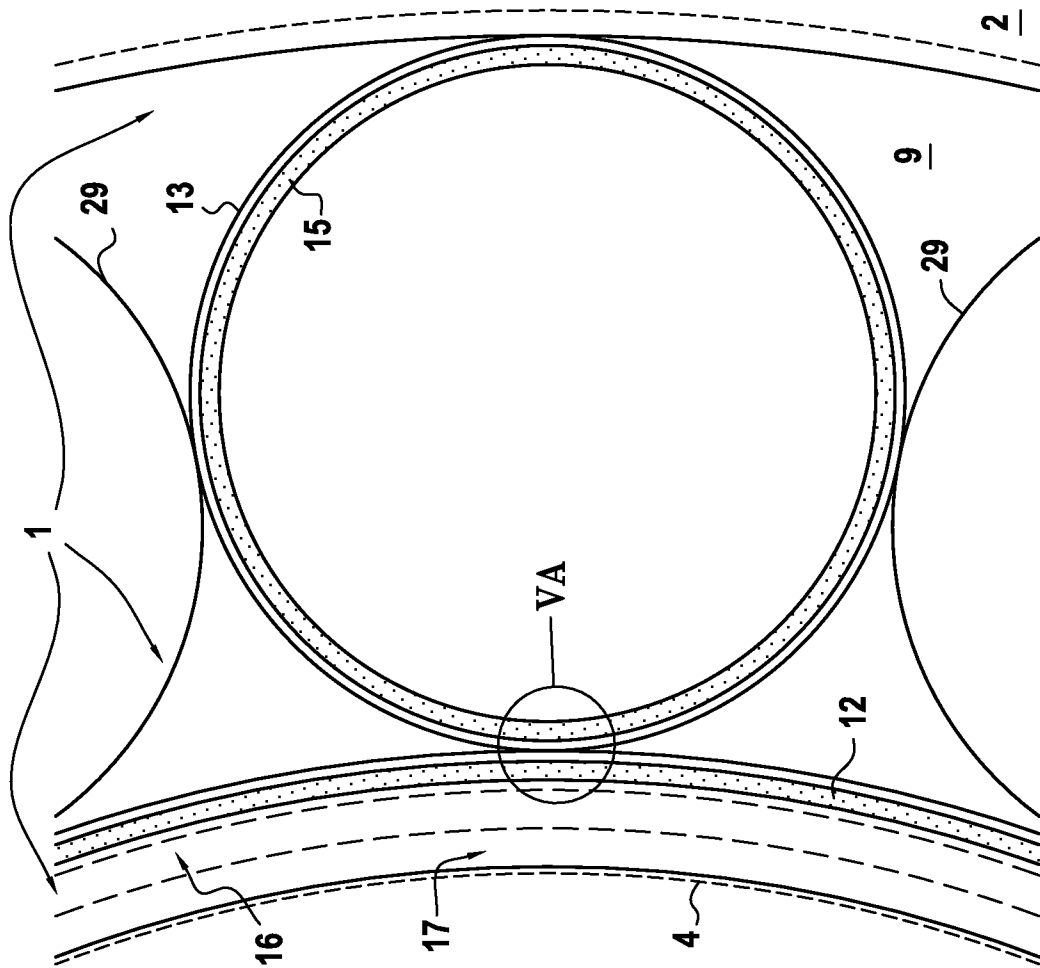


FIG. 5

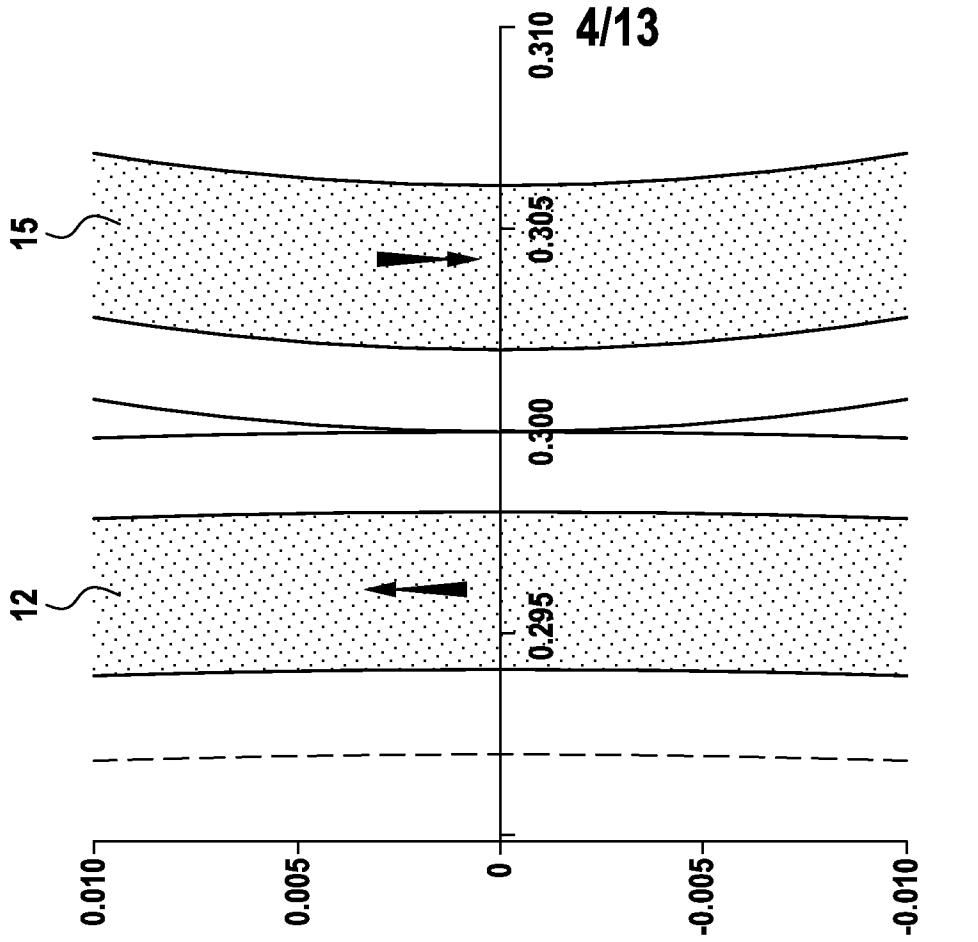


FIG. 5A

FIG.6

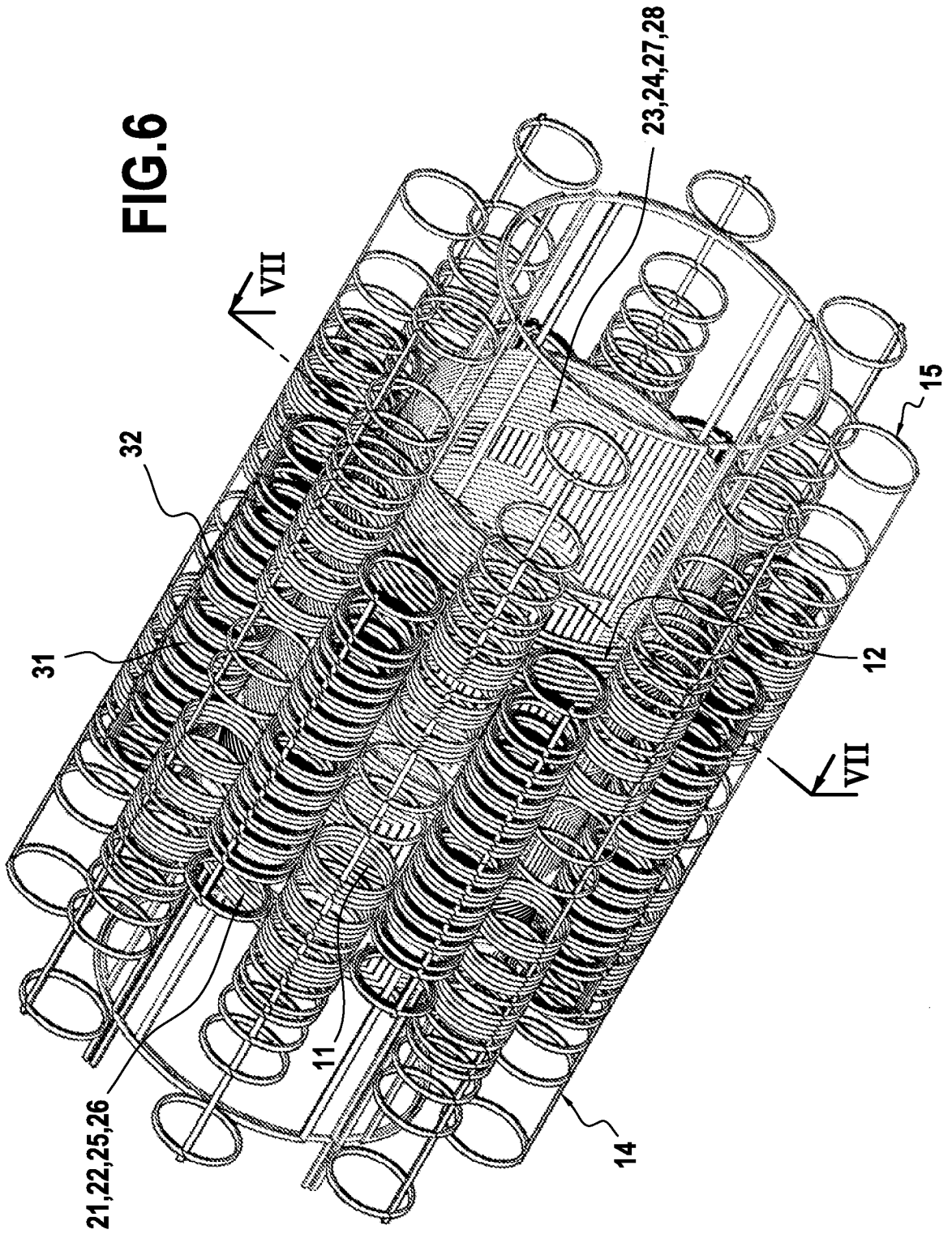


FIG.7

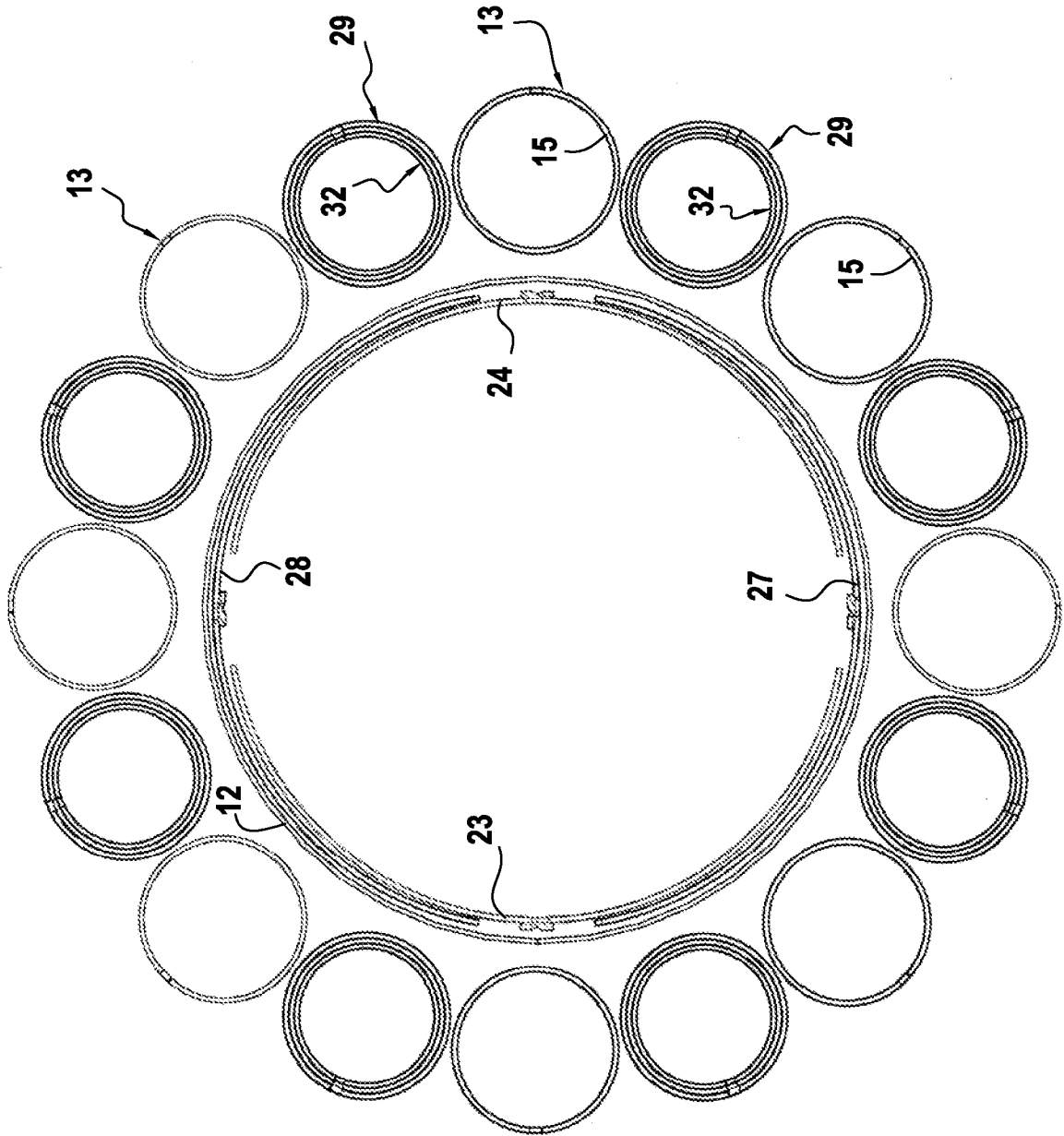
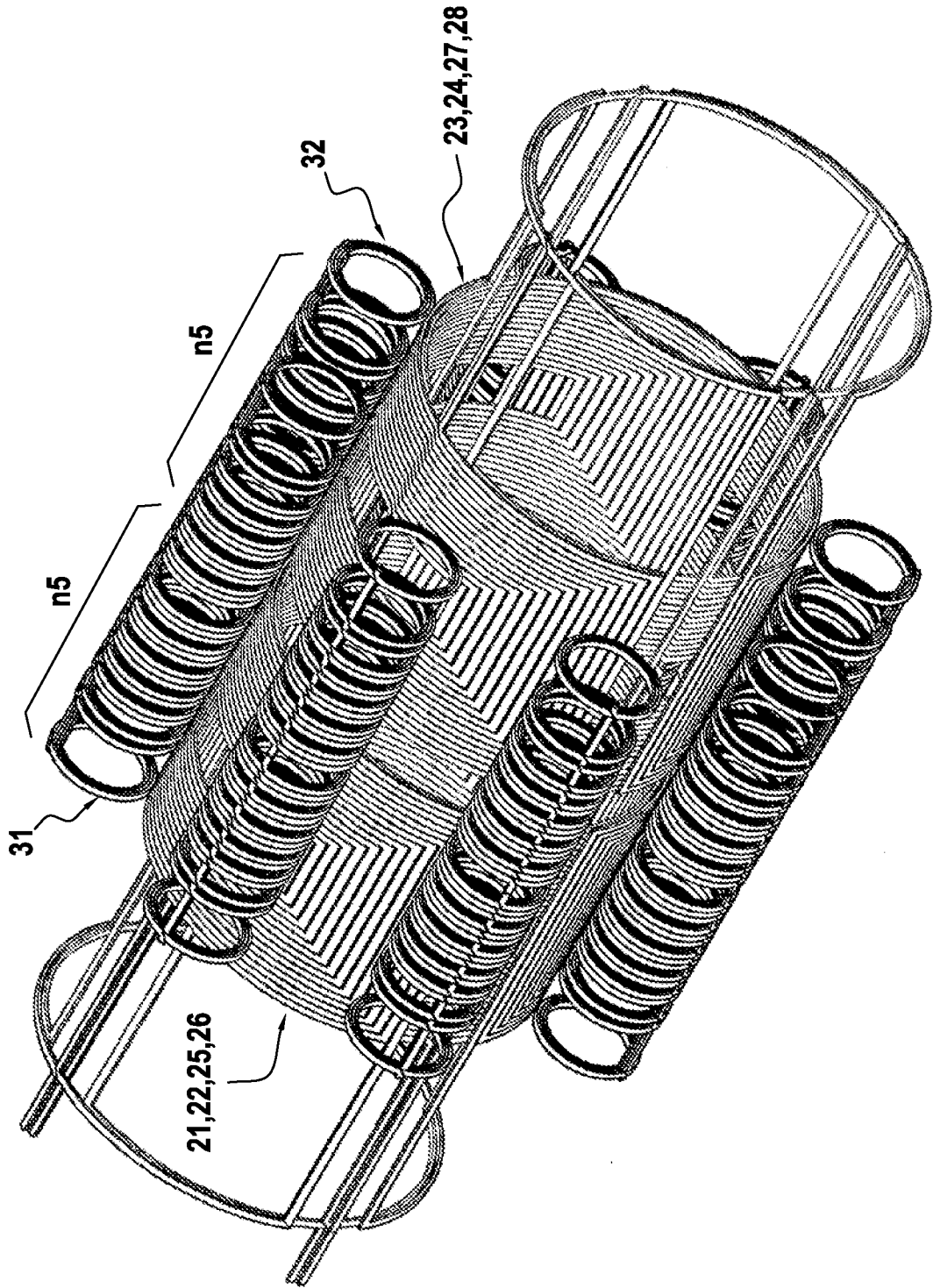


FIG.8



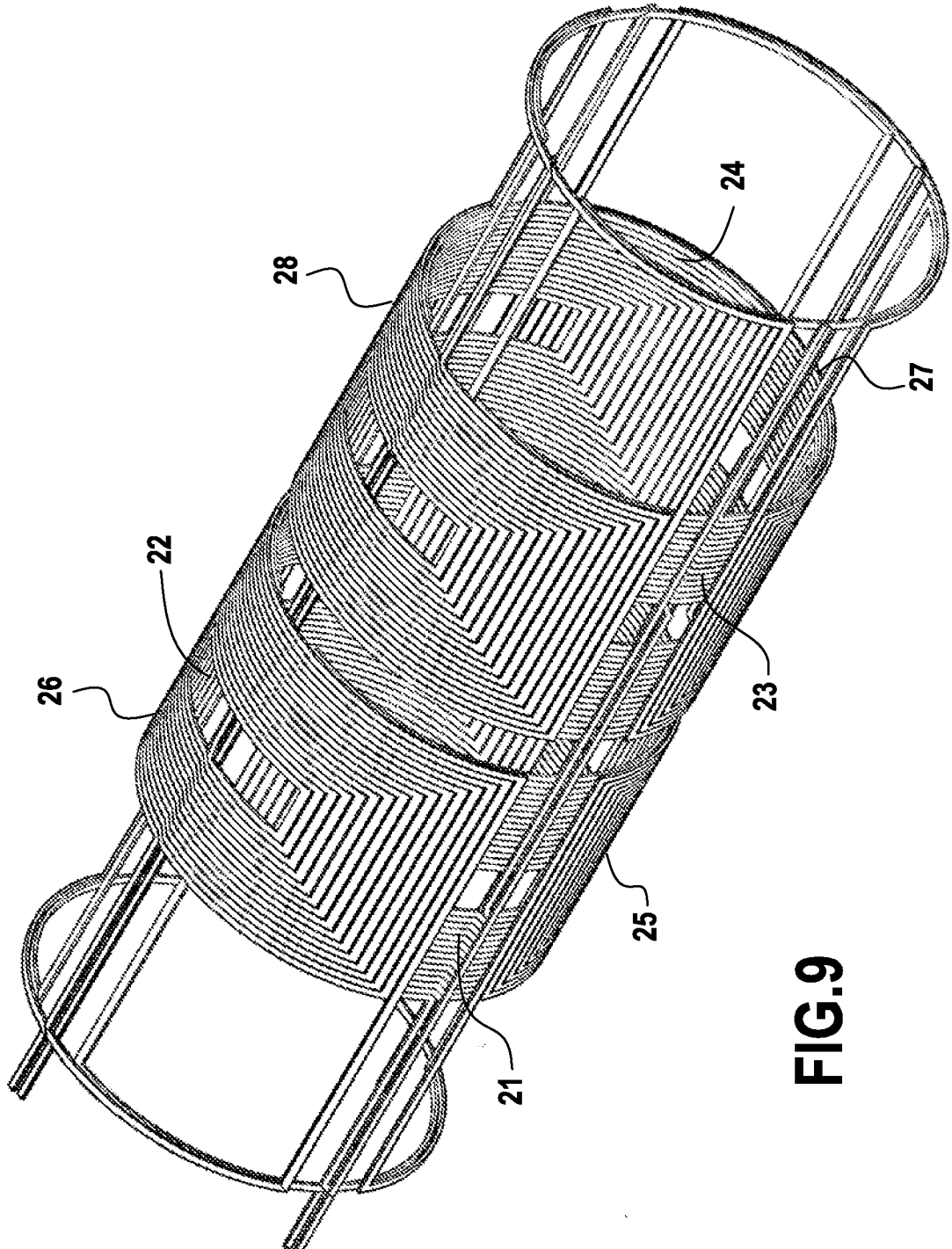


FIG.9

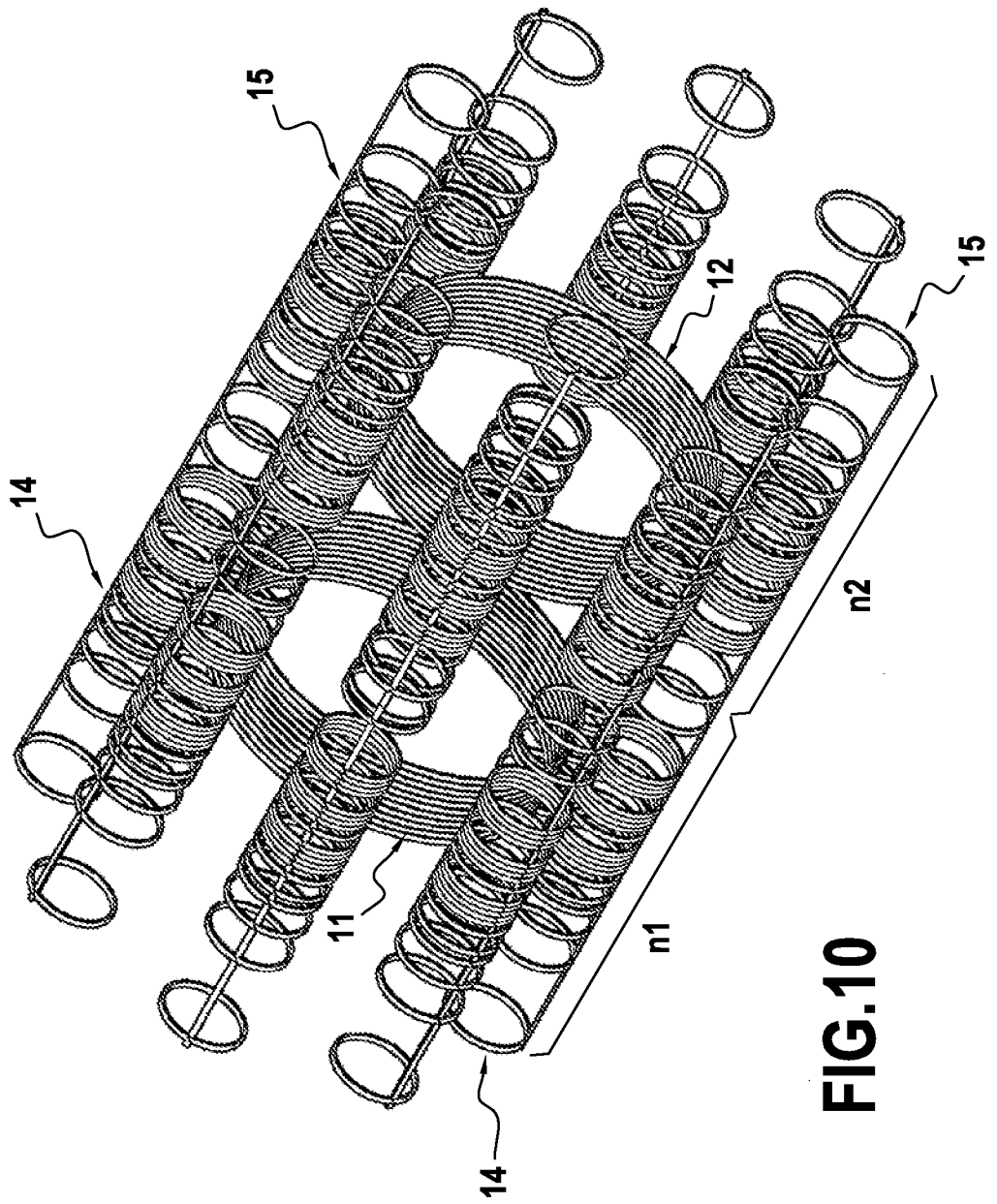


FIG.10

FIG.12

42

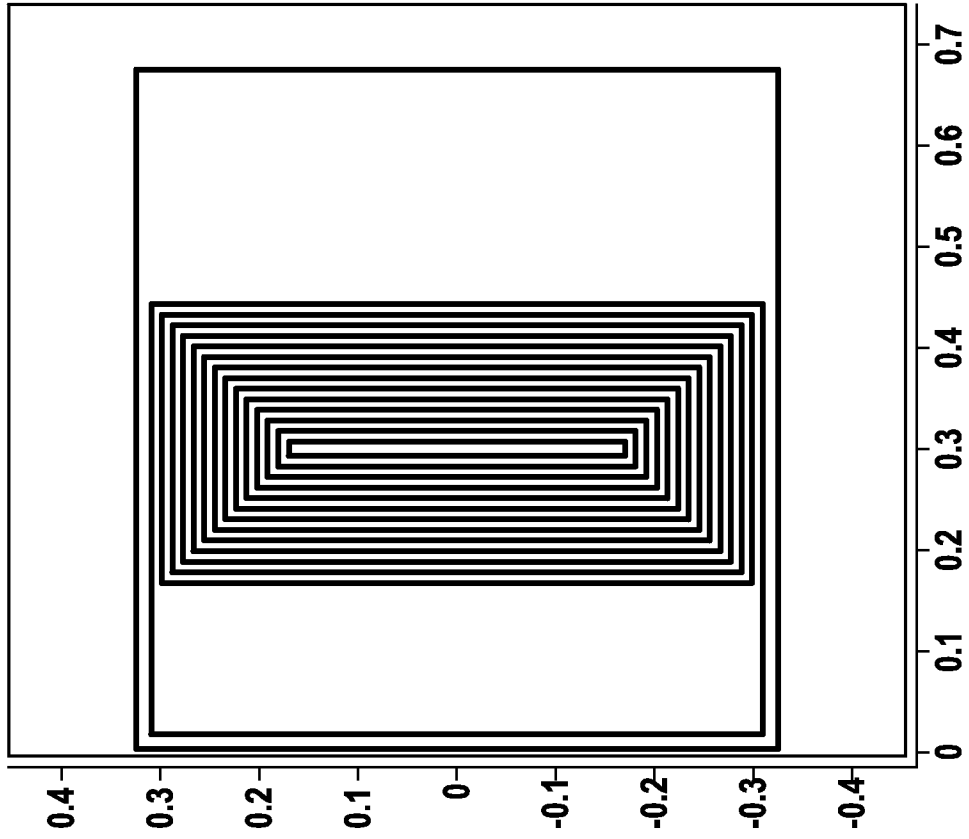
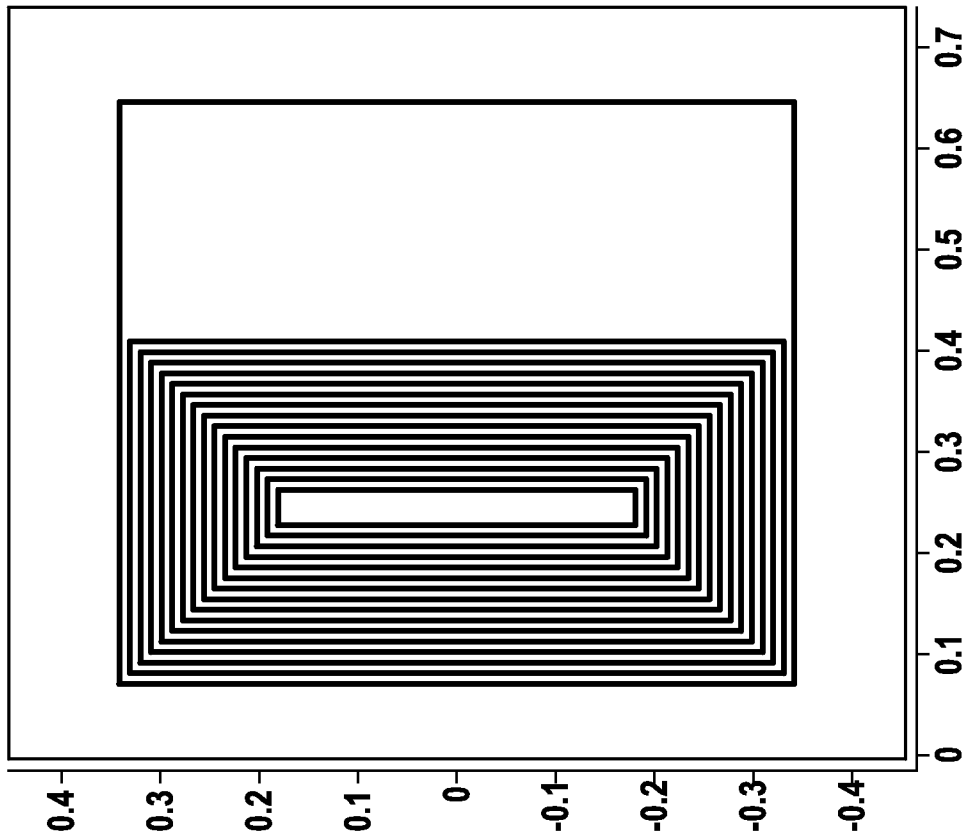
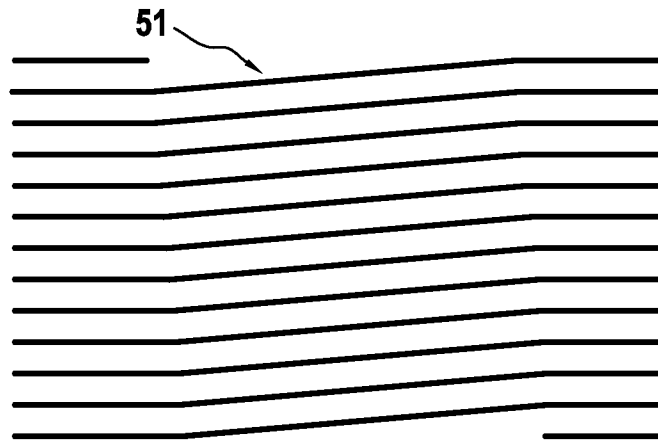


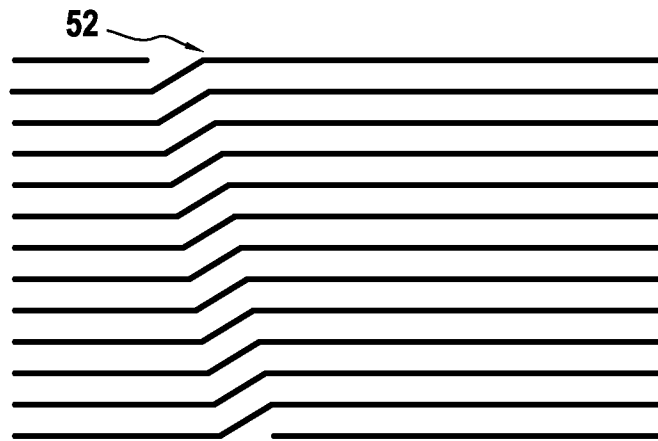
FIG.11

41

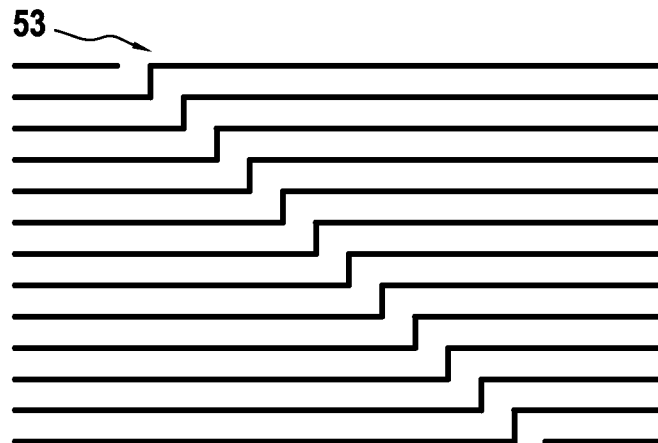




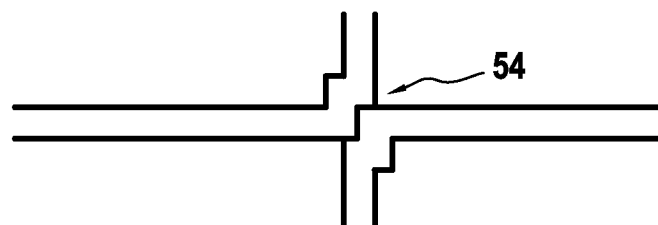
**FIG.13**



**FIG.14**



**FIG.15**



**FIG.16**

12/13

FIG.17

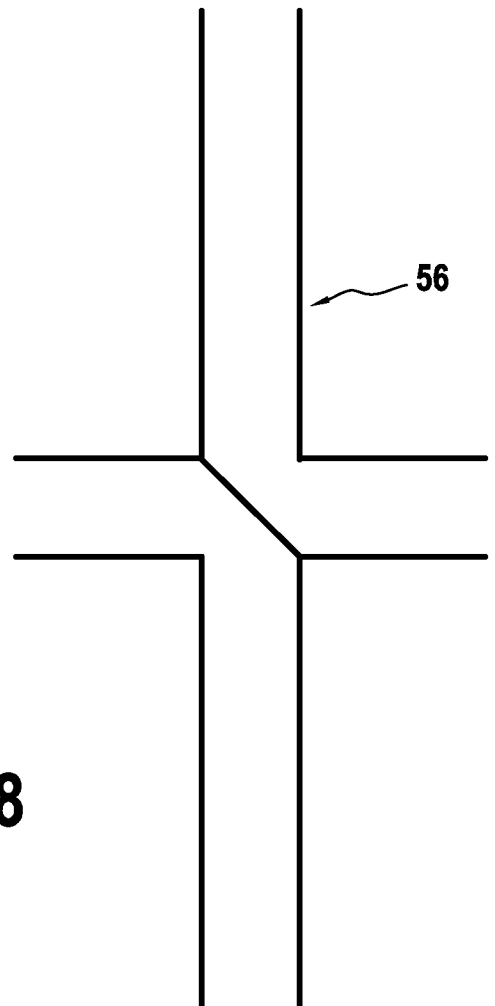
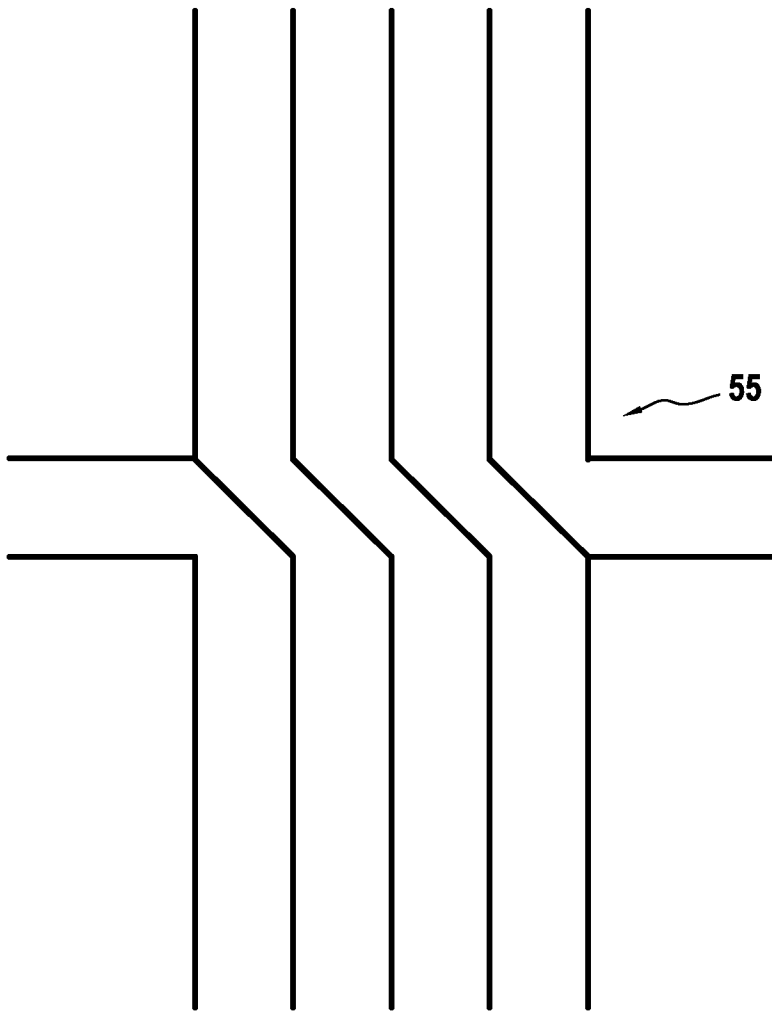


FIG.18

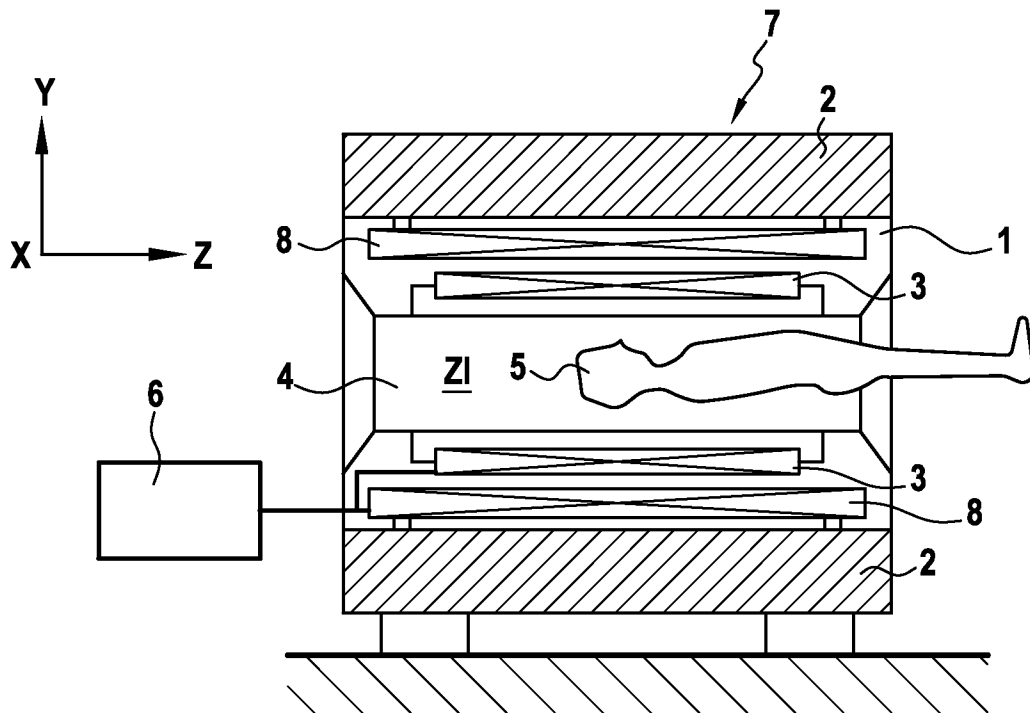


FIG.19

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No  
PCT/FR2012/051756

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
INV. G01R33/385 G01R33/3875  
ADD.  
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED  
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
G01R

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 530 355 A (DOTY F DAVID [US]) 25 June 1996 (1996-06-25) figures 4,5,7	1-8
A	FR 2 892 524 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 27 April 2007 (2007-04-27) the whole document	1-8
A	WO 2007/048983 A2 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]; AUBERT GUY [FR]) 3 May 2007 (2007-05-03) cited in the application the whole document	1-8
	----- -/--	

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

\* Special categories of cited documents :

<p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&amp;" document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search  17 October 2012	Date of mailing of the international search report  25/10/2012
--	--

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer  Raguin, Guy
--	---------------------------------------

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

 International application No  
 PCT/FR2012/051756

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2005/029110 A2 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]; AUBERT GUY [FR]) 31 March 2005 (2005-03-31) cited in the application the whole document	1-8
A	----- WO 89/03031 A1 (CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]) 6 April 1989 (1989-04-06) cited in the application the whole document	1-8
A	----- EP 0 221 810 A1 (THOMSON CGR [FR]) 13 May 1987 (1987-05-13) cited in the application the whole document	1-8
A	----- EP 0 140 259 A2 (GEN ELECTRIC [US]) 8 May 1985 (1985-05-08) cited in the application the whole document	1-8
A	----- US 4 617 516 A (SCHENCK JOHN F [US]) 14 October 1986 (1986-10-14) cited in the application the whole document           -----	1-8

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No  
PCT/FR2012/051756

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5530355	A	25-06-1996	NONE
-----			
FR 2892524	A1	27-04-2007	EP 1952171 A2 06-08-2008
			FR 2892524 A1 27-04-2007
			JP 2009513212 A 02-04-2009
			US 2009096451 A1 16-04-2009
			WO 2007048984 A2 03-05-2007
-----			
WO 2007048983	A2	03-05-2007	EP 1952170 A2 06-08-2008
			FR 2892523 A1 27-04-2007
			JP 2009513211 A 02-04-2009
			US 2009140737 A1 04-06-2009
			WO 2007048983 A2 03-05-2007
-----			
WO 2005029110	A2	31-03-2005	AU 2004274686 A1 31-03-2005
			CA 2539175 A1 31-03-2005
			EP 1692534 A2 23-08-2006
			FR 2859791 A1 18-03-2005
			JP 4716992 B2 06-07-2011
			JP 2007505665 A 15-03-2007
			US 2007052418 A1 08-03-2007
			WO 2005029110 A2 31-03-2005
-----			
WO 8903031	A1	06-04-1989	EP 0380533 A1 08-08-1990
			FR 2621125 A1 31-03-1989
			JP H02502070 A 12-07-1990
			US 5111147 A 05-05-1992
			WO 8903031 A1 06-04-1989
-----			
EP 0221810	A1	13-05-1987	EP 0221810 A1 13-05-1987
			FR 2588997 A1 24-04-1987
			US 4847985 A 18-07-1989
			US 5124652 A 23-06-1992
-----			
EP 0140259	A2	08-05-1985	DE 3484976 D1 02-10-1991
			EP 0140259 A2 08-05-1985
			FI 843378 A 03-05-1985
			IL 72931 A 30-12-1988
			JP 6028206 B 13-04-1994
			JP 60132303 A 15-07-1985
-----			
US 4617516	A	14-10-1986	DE 3478504 D1 06-07-1989
			EP 0136536 A2 10-04-1985
			FI 843065 A 07-03-1985
			IL 72723 A 30-12-1988
			JP 1654531 C 13-04-1992
			JP 3020056 B 18-03-1991
			JP 60094705 A 27-05-1985
			US 4617516 A 14-10-1986
-----			

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2012/051756

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01R33/385 G01R33/3875 ADD.				
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB				
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE				
Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01R				
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche				
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data				
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS				
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées		
A	US 5 530 355 A (DOTY F DAVID [US]) 25 juin 1996 (1996-06-25) figures 4,5,7 -----	1-8		
A	FR 2 892 524 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 27 avril 2007 (2007-04-27) le document en entier -----	1-8		
A	WO 2007/048983 A2 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]; AUBERT GUY [FR]) 3 mai 2007 (2007-05-03) cité dans la demande le document en entier -----	1-8		
	-/--			
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents                 </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe                 </td> </tr> </table>			<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents	<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents	<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe			
* Catégories spéciales de documents cités:				
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets			
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée  17 octobre 2012		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale  25/10/2012		
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé  Raguin, Guy		

**RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE**

Demande internationale n°

PCT/FR2012/051756

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	WO 2005/029110 A2 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]; AUBERT GUY [FR]) 31 mars 2005 (2005-03-31) cité dans la demande le document en entier -----	1-8
A	WO 89/03031 A1 (CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]) 6 avril 1989 (1989-04-06) cité dans la demande le document en entier -----	1-8
A	EP 0 221 810 A1 (THOMSON CGR [FR]) 13 mai 1987 (1987-05-13) cité dans la demande le document en entier -----	1-8
A	EP 0 140 259 A2 (GEN ELECTRIC [US]) 8 mai 1985 (1985-05-08) cité dans la demande le document en entier -----	1-8
A	US 4 617 516 A (SCHENCK JOHN F [US]) 14 octobre 1986 (1986-10-14) cité dans la demande le document en entier -----	1-8

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2012/051756

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5530355	A	25-06-1996	AUCUN	
FR 2892524	A1	27-04-2007	EP 1952171 A2 FR 2892524 A1 JP 2009513212 A US 2009096451 A1 WO 2007048984 A2	06-08-2008 27-04-2007 02-04-2009 16-04-2009 03-05-2007
WO 2007048983	A2	03-05-2007	EP 1952170 A2 FR 2892523 A1 JP 2009513211 A US 2009140737 A1 WO 2007048983 A2	06-08-2008 27-04-2007 02-04-2009 04-06-2009 03-05-2007
WO 2005029110	A2	31-03-2005	AU 2004274686 A1 CA 2539175 A1 EP 1692534 A2 FR 2859791 A1 JP 4716992 B2 JP 2007505665 A US 2007052418 A1 WO 2005029110 A2	31-03-2005 31-03-2005 23-08-2006 18-03-2005 06-07-2011 15-03-2007 08-03-2007 31-03-2005
WO 8903031	A1	06-04-1989	EP 0380533 A1 FR 2621125 A1 JP H02502070 A US 5111147 A WO 8903031 A1	08-08-1990 31-03-1989 12-07-1990 05-05-1992 06-04-1989
EP 0221810	A1	13-05-1987	EP 0221810 A1 FR 2588997 A1 US 4847985 A US 5124652 A	13-05-1987 24-04-1987 18-07-1989 23-06-1992
EP 0140259	A2	08-05-1985	DE 3484976 D1 EP 0140259 A2 FI 843378 A IL 72931 A JP 6028206 B JP 60132303 A	02-10-1991 08-05-1985 03-05-1985 30-12-1988 13-04-1994 15-07-1985
US 4617516	A	14-10-1986	DE 3478504 D1 EP 0136536 A2 FI 843065 A IL 72723 A JP 1654531 C JP 3020056 B JP 60094705 A US 4617516 A	06-07-1989 10-04-1985 07-03-1985 30-12-1988 13-04-1992 18-03-1991 27-05-1985 14-10-1986