

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

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

2 959 059

②1 N° d'enregistrement national : **10 52952**

⑤1 Int Cl⁸ : **H 01 F 41/04** (2006.01), **H 01 F 6/06**

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 19.04.10.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 21.10.11 Bulletin 11/42.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : *CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : DEBRAY FRANCOIS, DUMAS JEAN,
PFISTER ROLF, TROPHIME CHRISTOPHE, TUDELA
JEAN-MARC et VIDAL NADINE.

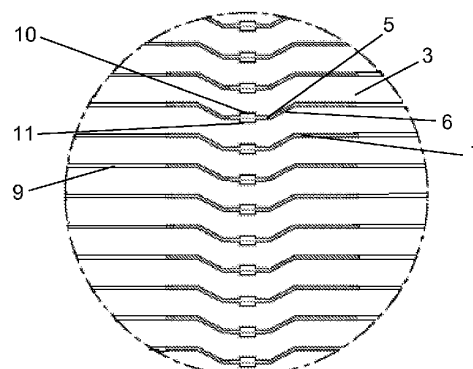
⑦3 Titulaire(s) : CENTRE NATIONAL DE LA RECHER-
CHE SCIENTIFIQUE (CNRS).

⑦4 Mandataire(s) : CABINET REGIMBEAU.

⑤4 **BOBINE AMELIOREE APTÉ A GÉNÉRER UN CHAMP MAGNÉTIQUE INTENSE ET PROCÉDE DE
FABRICATION DE LADITE BOBINE.**

⑤7 L'invention concerne un procédé de fabrication d'une bobine pour générer un champ magnétique intense lorsqu'elle est traversée par un courant électrique comportant la formation de spires dans un tube obtenu dans un matériau conducteur ou supraconducteur, le procédé comportant la formation d'au moins un renforcement dans une arête d'au moins une spire de ladite bobine pour former un passage entre l'intérieur et l'extérieur du tube.

Un autre objet de l'invention concerne une bobine pour générer un champ magnétique intense lorsqu'elle est traversée par un courant électrique, ladite bobine (1) étant constituée d'au moins d'un tube (2) obtenu dans un matériau conducteur ou supraconducteur et découpé suivant une ligne de découpe pour former des spires (3), au moins une spire (3) de la bobine (1) comportant au moins un renforcement (10) formé dans une arête de ladite spire pour former un passage entre l'intérieur et l'extérieur du tube (2).



FR 2 959 059 - A1



**Bobine améliorée apte à générer un champ magnétique intense
et procédé de fabrication de ladite bobine**

DOMAINE DE L'INVENTION

5 La présente invention concerne une bobine apte à générer un champ magnétique particulièrement adaptée pour la génération de champs magnétiques intenses et/ou pour la tenue à des efforts mécaniques importants et un procédé de fabrication de ladite bobine.

10 **ETAT DE LA TECHNIQUE**

 Dans le domaine de la production des champs magnétiques, il est bien connu de générer un champ magnétique intense par des "aimants" constitués d'une ou plusieurs bobines traversées par un courant électrique intense, lesdites bobines étant refroidies.

15 Les dites bobines peuvent être constituées de tubes cylindriques obtenus dans un matériau conducteur ou supraconducteur et découpés suivant une ligne de découpe globalement hélicoïdale, à pas constant ou non, pour former des spires.

 Ces bobines pour champs intenses sont actuellement presque exclusivement utilisées dans les laboratoires de champs magnétiques intenses et pourraient, par
20 exemple, être utilisées utilement dans des machines de RMN selon l'acronyme « Résonance Magnétique Nucléaire » pour la réalisation d'imagerie par résonance magnétique.

 Ces machines RMN présentent usuellement une structure du type tunnel avec un espace central réservé au patient et une structure annulaire qui intègre d'une part
25 des moyens pour créer dans l'espace central d'observation un champ magnétique principal homogène et intense et d'autre part des moyens d'excitation radiofréquence et de traitement des signaux radiofréquence réémis par le corps du patient placé dans l'espace central d'observation, en réponse aux séquences d'excitation. Afin de différencier les signaux radiofréquence émis en réponse et créer une image, ces
30 machines comportent également des bobines dites de gradient pour superposer au champ homogène intense des champs magnétiques additionnels dont la valeur dépend des coordonnées spatiales de leur lieu d'application.

 Une telle machine RMN est par exemple décrite dans la demande de brevet français FR 2 892 524.

On connaît par ailleurs les documents US 2,592,802, EP 0146494 et US 3,466,743 qui décrivent des bobines d'induction.

Le document US 2,592,802 décrit une bobine d'induction constituée d'un tube obtenu dans un matériau conducteur et découpé suivant plusieurs lignes globalement
5 hélicoïdales pour former des spires qui sont séparées par une portion verticale assurant une séparation entre les spires. Ladite partie de séparation est découpée pour former une paire de membres d'espacement de part et d'autre d'un trou cylindrique dans lequel est avantageusement inséré une tige obtenue dans un matériau isolant.

Le document EP 0146494 décrit une bobine d'induction constituée de découpes
10 annulaires incomplètes pratiquées dans un tube cylindrique, lesdites découpes annulaires incomplètes étant reliées par deux découpes verticales. Ce type de bobine d'induction est destiné à permettre le déplacement des espaceurs dans les réacteurs nucléaires et n'est pas destiné à recevoir des courants de haute intensité pour la formation de champs intenses.

Le document US 3,466,743 décrit une bobine constituée d'un tube obtenu dans un
15 matériau conducteur et découpé suivant une ligne globalement hélicoïdale pour former des spires, lesdits spires passant par des trous initialement pratiqués le long du tube, la ligne de coupe étant remplie d'un matériau isolant afin de prévenir toute déformation lorsque la bobine est traversée par des courants de très hautes intensités.

Aucune des bobines décrites dans ces documents n'est toutefois destinée à la
20 formation de champs magnétiques dits intenses (c'est-à-dire supérieur à 1 T), ou à être placé dans un champ magnétique intense, et leur structure n'est pas adaptée pour de telles applications.

En particulier, les bobines de gradient de champs magnétiques ou générant un
25 champ magnétique intense sont soumises à des forces électromagnétiques intenses qui induisent des efforts mécaniques conduisant à une déformation des spires de la bobine. La déformation des spires peut induire un manque de fiabilité de la machine et/ou une inhomogénéité du champ magnétique préjudiciable pour la réalisation d'imagerie de bonne qualité. C'est ainsi qu'il a été proposé dans la demande
30 WO 2009/053420 publiée le 30 avril 2009 d'utiliser des bobines constituées d'un tube obtenu dans un matériau conducteur et découpé suivant une ligne globalement hélicoïdale pour former une pluralité de spires, dans laquelle au moins une spire comporte au moins un bossage s'étendant au droit d'un creux de forme correspondante formé dans une spire adjacente. Une telle configuration est

avantageuse en ce qu'elle permet de reprendre les efforts mécaniques induits par les forces électromagnétiques et les forces mécaniques d'origine thermique.

Toutefois, pour de nombreuses applications comme les aimants supraconducteurs, il est nécessaire que la structure de bobine puisse être refroidie en permanence, notamment par la circulation d'un fluide de refroidissement, de préférence un fluide cryogénique (à base d'azote, d'hélium ou d'hydrogène par exemple). Ce refroidissement doit en outre être le plus homogène possible dans la structure. Un tel refroidissement est particulièrement utile pour compenser l'augmentation thermique subie par la structure en cas de transit ou transition résistive (« quench » en anglais).

L'un des buts de l'invention est donc de remédier à tous ces inconvénients en proposant une bobine ou un ensemble de bobines adaptées pour la génération d'un champ magnétique intense, notamment pour former des aimants supraconducteurs, et un procédé de fabrication de ladite bobine de conception simple et peu onéreuse.

Plus précisément un but de la présente invention est de fournir une bobine ou un ensemble de bobines adapté pour être régulé thermiquement et simple de fabrication, et procurant de préférence une reprise des efforts mécaniques induits sur les spires des bobines par les forces électromagnétiques et/ou les forces mécaniques d'origine thermique.

20

EXPOSE DE L'INVENTION

A cet effet et conformément à l'invention, il est proposé un procédé de fabrication d'une bobine apte à générer un champ magnétique dit champ intense lorsqu'elle est traversée par un courant électrique comportant une étape de formation de spires dans un tube obtenu dans un matériau conducteur et/ou supraconducteur caractérisé en ce qu'il comprend au moins une étape de formation d'au moins un renforcement dans une arête d'au moins une spire de ladite bobine, ledit renforcement formant un passage entre l'intérieur et l'extérieur du tube.

Des aspects préférés mais non limitatifs de ce procédé, pris seuls ou en combinaison, sont les suivants :

- l'étape de formation d'au moins un renforcement comprend la formation d'au moins un premier renforcement dans une arête d'au moins une spire de ladite bobine et d'au moins un deuxième renforcement dans une arête d'une spire adjacente de manière à ce que le premier renforcement fasse face au deuxième

renforcement, les premier et deuxième renforcements ménagés dans les spires adjacentes formant le passage entre l'intérieur et l'extérieur du tube.

- le procédé comprend en outre la formation d'au moins un bossage sur la spire comprenant le premier renforcement et la formation d'au moins un creux sur la
5 spire comprenant le deuxième renforcement de manière à ce que le bossage s'étende au droit dudit creux, permettant de reprendre les efforts mécaniques induits par les forces électromagnétiques et les forces mécaniques d'origine thermique.

- le premier renforcement est formé dans l'arête de la spire au niveau du profil en forme de bossage et le deuxième renforcement est formé dans l'arête de la
10 spire au niveau du profil en forme de creux.

- les formations du bossage et du premier renforcement sont faites de manière concomitante, et en ce que les formations du creux et du deuxième renforcement sont faites de manière concomitante.

- le procédé comporte une étape préalable d'optimisation du ou des
15 bossages et du ou des creux correspondants, et des renforcements.

- l'étape d'optimisation consiste au moins dans les étapes suivantes de :
 o détermination d'un maillage des spires, du ou des bossages et du ou des creux correspondants, et des renforcements,
 o simulation des échauffements thermiques et/ou des champs
20 électromagnétiques à partir du maillage,
 o comparaison des échauffements thermiques et/ou des champs électromagnétiques avec ceux d'un maillage dit de référence ne comportant pas de bossages et/ou ne comportant pas de renforcements,
 o comparaison des déplacements sous les chargements
25 électromagnétiques et thermiques des spires avec ceux d'un modèle dit de référence ne comportant pas de bossages et/ou ne comportant pas de renforcements.

- les spires, les bossages et les creux correspondants, et les
30 renforcements sont formés par une découpe d'un tube cylindrique suivant une ligne de coupe globalement hélicoïdale.

- un matériau isolant est déposé dans la ligne de découpe entre deux spires adjacentes.

Selon un autre aspect de l'invention il est proposé une bobine apte à générer un champ magnétique dit champ intense lorsqu'elle est traversée par un courant électrique, ladite bobine comprenant au moins d'un tube ou d'un ensemble de tubes obtenu dans un matériau conducteur et/ou supraconducteur et découpé suivant une
5 ligne de découpe pour former des spires, caractérisée en ce qu'au moins une spire comporte au moins un renforcement formé dans une arête de ladite spire, ledit renforcement formant un passage entre l'intérieur et l'extérieur du tube.

Des aspects préférés mais non limitatifs de cette bobine, pris seuls ou en
10 combinaison, sont les suivants :

- au moins une spire comporte au moins un premier renforcement formé dans une arête de ladite spire et faisant face un deuxième renforcement formé dans une arête d'une spire adjacente, les premier et deuxième renforcements ménagés dans les spires adjacentes formant le passage entre l'intérieur et l'extérieur du tube.
- 15 - la spire comprenant le premier renforcement comprend en outre au moins un bossage s'étendant au droit d'un creux de forme correspondante formé dans la spire adjacente comprenant le deuxième renforcement, les premier et deuxième renforcements étant formés dans l'arête des spires correspondantes au niveau du profil en forme de bossage et de creux respectivement.
- 20 - les bossages adjacents d'une spire sont décalés angulairement.
- la bobine comporte une pluralité de bossages et de creux dont la concavité est orientée dans une même direction.
- la bobine comporte une pluralité de bossages et de creux et en ce que la concavité d'au moins un bossage présente une orientation opposée à l'orientation de
25 la concavité d'au moins un second bossage.
- chaque renforcement présente une forme générale hémicirculaire ou triangulaire ou carrée ou rectangulaire ou trapézoïdale.
- les spires comprennent plusieurs renforcements, les renforcements adjacents d'une spire étant décalés angulairement.
- 30 - la bobine comporte un matériau isolant comblant au moins partiellement la ligne de découpe, au moins un renforcement étant ménagé dans une arête de spire en regard dudit matériau isolant.
- la bobine est obtenue dans un matériau supraconducteur massif.
- la bobine comprend en outre un ruban ou fil formé dans un matériau
35 supraconducteur, ledit ruban ou fil étant fixé sur la face interne et/ou externe du tube.

La bobine selon l'invention sera avantageusement utilisée pour former un aimant pour champ intense ou homogène, comme par exemple un aimant supraconducteur.

Une telle bobine pourra également être utilisée comme bobine de gradient
5 solénoïdale d'une machine à résonance magnétique nucléaire.

DESCRIPTION DES FIGURES

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront mieux de la description qui va suivre de plusieurs variantes d'exécution, données à titre d'exemples non limitatifs,
10 une bobine apte à générer un champ magnétique et particulièrement aptes à la génération d'un champ magnétique intense et un procédé de fabrication de ladite bobine conforme à l'invention, à partir des dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est vue en perspective d'une bobine selon un premier mode de réalisation de l'invention,
- 15 - la figure 2 est une vue en perspective d'une bobine selon un deuxième mode de réalisation de l'invention,
- la figure 3 est une vue en perspective d'un détail d'une bobine selon un troisième mode de réalisation de l'invention, avant compression des plaques d'isolant,
- 20 - la figure 4 est une vue en perspective d'un détail de la bobine selon le troisième mode de réalisation de l'invention, après compression des plaques d'isolant,
- la figure 5 est un diagramme représentant les étapes de fabrication d'une bobine conforme à l'invention.

25

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

En référence à la figure 1, la bobine 1 comprend un tube 2, de préférence globalement cylindrique creux, dans lequel des spires 3 ont été formées par une découpe, par tout moyen approprié, selon une ligne de découpe 4 de préférence
30 hélicoïdale, ledit tube 2 étant obtenu dans un matériau électriquement conducteur, tel que des métaux ou de préférence un supraconducteur massif (tel que des alliages au Bismuth ou des composés d'Yttrium ou de MgB₂ par exemple) et ladite bobine comportant éventuellement un matériau isolant comblant la ligne de découpe 4 de manière bien connue par l'Homme du Métier.

Le tube 2 pourvu de spires 3 peut constituer la bobine 1 en tant que telle. Toutefois, selon un autre mode de réalisation, le tube avec les spires constitue un support pour un bobinage, cet ensemble support + bobinage formant ladite bobine. Dans le cas d'un aimant supraconducteur, le bobinage peut par exemple être formé d'un ruban ou d'un fil supraconducteur (constitué par exemple d'un alliage de type NbTi, Nb₃Sn, Nb₃Al, ou YBaCuO) entourant le tube découpé en spirale. Ainsi, le tube sert de support mécanique au ruban et est en outre utilisé dans la régulation thermique de l'aimant supraconducteur. Dans une autre variante le ruban ou le fil supraconducteur est fixé en appui sur la face interne du tube découpé en hélice. Par ailleurs, la bobine peut être constituée d'une pluralité de tubes 2.

Selon l'invention, au moins un renforcement 10 est ménagé dans l'arête d'au moins une des spires 3, un tel renforcement étant prévu pour former une ouverture, c'est-à-dire un passage ou canal, entre l'intérieur et l'extérieur du tube 2 lorsque la bobine est contrainte.

Le passage ainsi formé entre l'intérieur et l'extérieur du tube permet de faire circuler un fluide de refroidissement à travers la bobine, tel que par exemple de l'eau ou un fluide cryogénique (e.g. fluide à base d'azote, d'hélium ou d'hydrogène). Cela permet donc d'avoir un refroidissement permanent de la structure, que le tube serve de support à un bobinage pour former la bobine ou qu'il constitue la bobine en tant que telle.

Une telle possibilité de refroidissement est particulièrement avantageuse pour assurer les transferts thermiques nécessaires pour compenser toute augmentation thermique subie par une bobine supraconductrice en cas de transit ou transition de l'état supraconducteur vers l'état résistif (« quench » en anglais).

Le fait de pouvoir réguler thermiquement la bobine par le passage de fluide de refroidissement entre l'intérieur et l'extérieur du tube est également particulièrement avantageux pour réduire les déformations mécaniques qui peuvent être d'origine thermique.

De manière préférée, le ou les renforcements sont ménagés dans la zone des arêtes des spires située en regard du matériau isolant. En effet, lorsqu'un matériau isolant est placé dans la ligne de découpe 4, comblant tout ou partie de cette ligne de découpe 4, ce matériau isolant forme une barrière empêchant la circulation du fluide caloporteur entre deux spires adjacentes, et il en résulte un échauffement local présent dans le fonctionnement normal des aimants résistifs et dans le cas d'un « quench » pour un supraconducteur. Lorsqu'au moins l'une des spires 3 en regard

du matériau isolant présente un renforcement 10 au niveau de son arête, un tel renforcement forme une ouverture qui va permettre le transfert thermique recherché.

Les renforcements ménagés dans les arêtes de chacune des spires peuvent avoir une forme quelconque, par exemple hémicirculaire, triangulaire, carrée, 5 rectangulaire, trapézoïdale, ou toute autre forme permettant de créer un passage pour un fluide de refroidissement. Il est à noter que la forme et la taille du renforcement seront optimisées pour permettre le passage du fluide de refroidissement et pour contrôler sa vitesse d'écoulement tout en garantissant les propriétés physiques (notamment mécanique et électrique) des spires (en tenant par 10 exemple compte de la largeur minimale des spires).

Selon un mode de réalisation préféré de l'invention, une pluralité de spires 3 de la bobine 1 comporte un renforcement 10 faisant face à un renforcement 15 complémentaire 11 formé dans une spire 3 adjacente, de sorte que la coopération de ces renforcements (10,11) forme l'ouverture entre l'intérieur et l'extérieur du tube 2 pour le passage d'un fluide de refroidissement.

Un tel mode de réalisation est en particulier préféré lorsque la largeur des spires doit rester faible, ce qui permet de répartir la taille de l'ouverture sur deux spires adjacentes, et évite donc de trop fragiliser les spires au niveau des renforcements. Dans ce cas, les renforcements ménagés dans plusieurs spires adjacentes peuvent 20 avantageusement présenter un décalage angulaire.

Dans l'exemple particulier de réalisation présenté à la figure 1, la largeur de chaque spire 3 est constante ; toutefois, la largeur de tout ou partie des spires pourra être variable, la largeur de l'espace séparant deux spires adjacentes étant de préférence constante y compris au niveau des renforcements.

25 Comme indiqué précédemment, les spires 3 sont de préférence formées dans un tube 2 globalement cylindrique par découpe suivant une ligne de découpe hélicoïdale 4. La découpe hélicoïdale 4 est obtenue suivant les équations paramétriques dans un système cartésien orthonormé ou l'axe Oz est confondu avec l'axe de révolution du tube 2 :

30 $x = R \cos t$, $y = R \sin t$, $z = kt$ où k désigne une constante donnée strictement positive. R et t correspondent aux coordonnées cylindriques dans un plan OXOY.

Selon un mode de réalisation préféré de l'invention tel qu'illustré à la figure 2, une pluralité de spires 3 de la bobine 1 comporte un bossage 5 s'étendant au droit 35 d'un creux 6 de forme correspondante formé dans une spire 3 adjacente permettant

de reprendre les efforts mécaniques induits par les couples électromagnétiques sur les spires 3 lorsqu'elles sont traversées par un courant de forte intensité. Comme précédemment, il est en outre prévu un renforcement 10 dans l'arête de la spire 3 au niveau du profil en forme de bossage 5, et de manière optionnelle mais préférée, un renforcement complémentaire 11 dans l'arête de la spire 3 au niveau du profil en forme de creux 6. Chaque renforcement est formé dans le profil en forme de bossage d'une spire de manière à faire face au renforcement complémentaire ménagé dans le profil en forme de creux de la spire adjacente. De cette manière, lorsque le bossage 5 s'étend au droit du creux 6 correspondant, les renforcements (10,11) coopèrent pour former un passage ou canal entre l'intérieur et l'extérieur du tube, celui-ci pouvant être utilisé pour le passage du fluide de refroidissement.

Un tel agencement de bossage et de creux associés aux renforcements dans chacune des spires est très avantageux pour compenser les déformations mécaniques d'origine thermique d'une part, et celles dues aux forces électromagnétiques. Cet effet combiné vient s'ajouter à l'effet initial des renforcements en termes de régulation thermique.

En outre, le fait de placer les renforcements au niveau des bossages et creux est particulièrement avantageux puisque cela permet d'usiner lesdits renforcements de manière concomitante avec les bossages et creux correspondants (par exemple par une méthode de découpe au fil par électroérosion), et ne vient donc pas complexifier le processus d'usinage de la bobine, tout en améliorant grandement les propriétés thermiques de ladite bobine.

Dans l'exemple particulier de réalisation présenté, tous les bossages 5 et les creux 6 des spires 3 sont globalement alignés le long d'une droite longitudinale.

Néanmoins, il est bien évident que les bossages 5 de deux spires adjacentes peuvent être décalés angulairement.

La partie supérieure de la bobine 1, arbitrairement représentée verticalement sur la figure 2, comporte une pluralité de bossages 5 et de creux 6 dont la concavité est orientée dans une même direction, vers l'extrémité inférieure de ladite bobine 1.

Par ailleurs, la partie inférieure de la bobine 1 comporte également une pluralité de bossages 5 et de creux 6 dont la concavité est orientée dans une même direction, par exemple vers l'extrémité supérieure de ladite bobine 1, opposée à la direction à l'orientation de la concavité des bossages 5 des spires 3 de la partie supérieure de ladite bobine.

Il va de soi que la bobine 1 pourra ne comprendre qu'un seul bossage et un seul creux ou une pluralité de bossages et de creux sur une ou plusieurs spires, la concavité d'au moins un bossage pouvant présenter une orientation opposée à l'orientation de la concavité d'au moins un second bossage.

5 Dans l'exemple de réalisation présenté, chaque bossage 5, et par conséquent chaque creux 6, présente une forme générale hémicirculaire ; toutefois, il est bien évident que chaque bossage 5 pourra présenter une forme quelconque telle qu'une forme triangulaire, carrée ou rectangulaire par exemple.

La découpe hélicoïdale 4 est obtenue suivant les équations paramétriques dans
10 un système orthonormé où l'axe Oz est confondu avec l'axe de révolution du tube 2 :

$x = R \cos f(t)$, $y = R \sin f(t)$, $z = k g(t)$ où R et k sont des constantes données strictement positives.

On notera que f(t) pourra être substituée par f(t,θ) pour régler l'angle de la découpe suivant Oz dans un plan radial. Les bossages 5 et les creux 6 présenteront
15 alors une forme globalement conique, c'est-à-dire que leurs bords ne seront pas perpendiculaires à l'axe de révolution du tube 2.

La fonction g(t) est de préférence une fonction trigonométrique de la forme par exemple : $x = R \cos (t)$, $y = R \sin (t)$

$$z = t/(2*\pi)*(1+a*\cos(4 t))$$

20 Ainsi, la découpe hélicoïdale 4 forme des bossages 5 et des creux 6 dans les spires 3 par rapport à une découpe hélicoïdale de référence obtenue selon les équations paramétriques :

$x = R \cos t$, $y = R \sin t$, $z = kt$ où k est une constante donnée strictement positive.

25 On entend ici par bossage une partie saillante d'une spire 3 par rapport à une spire obtenue par une ligne de découpe hélicoïdale de référence.

Selon une autre variante d'exécution la bobine conforme à l'invention, en référence aux figures 3 et 4, cette dernière est constituée de la même manière que
30 précédemment d'un tube 2 globalement cylindrique dans lequel des spires 3 ont été formées par découpe suivant une ligne de découpe globalement hélicoïdale 4, lesdites spires comportant des bossages 5 et des creux 6 de formes correspondantes, un renforcement étant en outre formée au niveau de chaque bossage et creux des spires. Dans l'exemple de réalisation présenté, lesdits

bossages 5 et lesdits creux 6 présentent une forme trapézoïdale tandis que les renforcements ont une forme rectangulaire.

La section des bossages 5 et des creux 6 peut décroître depuis la paroi extérieure vers la paroi intérieure du tube 3.

5 Cette forme de bossages et de creux est particulièrement adaptée pour la mise en œuvre de spires fines et/ou pour le calage d'isolant.

De plus, on notera que cette technique peut s'appliquer au design de bobines à densité de courant non uniforme.

Par ailleurs, en référence à la figure 3, des plaques d'isolant telles que par
10 exemple des plaques de fibre de verre pré-imprégnée dites « pre-preg », selon l'acronyme anglo-saxon « pre-impregnated » ou des feuilles d'isolants de type polyimide, peuvent être positionnées entre deux spires 3 adjacentes, lesdites plaques présentant de préférence une forme de section annulaire. Afin de permettre l'introduction de ces plaques d'isolant 7, les spires 3 sont écartées par tous moyens
15 appropriés (figure 3). Ces plaques d'isolant 7 sont avantageusement constituées de plusieurs feuilles fines d'isolant 8 superposées, de préférence au moins trois feuilles fines d'isolant 8 superposées. De cette manière, l'isolant une fois comprimé, en référence à la figure 4, se conforme au dessin de la spire 3 sans casser. En effet, cette superposition de feuilles fines d'isolant 8 procure une diminution des contraintes
20 internes à l'isolant. Par ailleurs, la feuille intermédiaire 8 n'est jamais en contact direct avec le métal ou le matériau supraconducteur des spires 3 assurant ainsi une sécurité électrique accrue.

Il est bien évident que les plaques d'isolant 7 pourront comprendre un nombre quelconque de feuilles 8 et qu'elles pourront être obtenues dans un matériau isolant
25 quelconque sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

Le positionnement du ou les renforcements (10,11) ménagés au niveau des bossages 5 et creux 6 dans la zone comprenant les plaques d'isolant 8, est particulièrement avantageux puisque l'ouverture ménagée par ces renforcements permet de garantir un transfert thermique dans cette zone, qui formerait dans le cas
30 contraire un point chaud dans la bobine ce que l'on cherche à éviter pour pouvoir avoir une régulation thermique homogène.

Il est par ailleurs à préciser que le calage de plaques d'isolants entre des bossages 5 et des creux 6 successifs peut permettre le passage de liquide de refroidissement entre deux zones comportant un bossage 5 et un creux 6 (figure 4).
35 En effet, les plaques d'isolant viennent écarter les spires 3 formées dans le tube 2,

créant ainsi des jours 9 entre deux zones comportant un bossage 5 et un creux 6, ces jours 9 permettant également une circulation d'un fluide de refroidissement entre l'intérieur et l'extérieur du tube et inversement. Ledit liquide de refroidissement consistant par exemple dans de l'eau dans le cas d'aimants résistifs, ou dans de l'hélium ou de l'azote liquide dans le cas des matériaux supraconducteurs. Un tel agencement permet donc d'avoir une régulation thermique accrue, puisqu'elle est effectuée non seulement par les jours 9 ménagés entre les creux 6 et bossages 5, mais également au niveau des passages formés par les renforcements (10,11).

On expliquera maintenant le procédé de fabrication d'une bobine conforme à l'invention, en référence à la figure 5.

Dans une première étape 100, un modèle géométrique des spires est réalisé à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) tel que CATIA® ou Open Cascade commercialisé par la société Open Cascade SAS. Un maillage des spires 3 et du ou des bossages 5 et du ou des creux 6 correspondants, et des renforcements (10,11) est réalisé, dans une étape 200, à partir du modèle CAO au moyen d'un logiciel adapté tel que, par exemple, le logiciel CATIA® ou un meilleur Ghs3d® de la société Distène, puis dans une étape 300, une simulation des échauffements thermiques et/ou des champs électromagnétiques et/ou du comportement mécanique correspondant au précédent maillage est réalisée.

Lesdits échauffements thermiques et/ou les champs électromagnétiques et/ou des déformations mécaniques obtenus par ce maillage sont comparés, dans une étape 400, avec un modèle dit de référence ne comportant pas de bossages et de creux, et/ou ne comportant pas de renforcements. Des modifications peuvent être effectuées si nécessaire sur la géométrie des spires. La procédure est alors répétée jusqu'à obtenir un modèle adapté.

La même procédure peut être utilisée pour l'optimisation des contraintes mécaniques.

Les étapes 100 à 400 sont alors réitérés jusqu'à l'obtention d'un maillage présentant un échauffement thermique minimal et/ ou un champ magnétique homogène ou quasi homogène et/ou une minimisation des déplacements consécutifs aux chargements électromagnétiques et thermiques.

La courbe paramétrée correspondant à la découpe retenue ainsi déterminée est alors transmise à une machine de découpe numérique, qui procède à la découpe des spires 3, des bossages 5 et des creux 6, et des renforcements (10,11) dans le tube

2, dans une étape 500. Lorsque les renforcements (10,11) sont positionnés au niveau des bossages 5 et creux 6, leur découpe peut être faite en même temps que les découpes des bossages 5 et creux 6 correspondants ce qui est très avantageux en termes d'usinage.

5 On observera que préalablement à l'étape de maillage 100, une étape de détermination du nombre de spires, de la largeur des spires et des dimensions du tube dont sa longueur, son épaisseur et son diamètre externe est opérée conformément aux enseignement de la publication « Magnet Calculations at the Grenoble High Magnetic Field Laboratory », Christophe Trophime, Konstantin
10 Egorov, François Debray, Walter Joss and Guy Aubert, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY. VOL. 12, NO 1, MARCH 2002.

Par ailleurs, on observera que les bossages 5 et les creux 6 coopèrent pour assurer un centrage des spires.

Il va de soi que le tube 2 pourra consister en un ensemble de tubes, ledit tube 2
15 ou l'ensemble de tubes étant formé de préférence dans un matériau conducteur et/ou supraconducteur massif. Alternativement, le tube 2 pourra consister en un tube support obtenu dans du cuivre ou de l'inox par exemple et sur lequel sont solidarisés, par soudure par exemple, des fils ou des câbles supraconducteurs. Le tube support muni des bossages 5 et des creux 6 et des renforcements conformes à l'invention a
20 alors une fonction de reprise des efforts électromagnétiques et une fonction de dissipation thermique en cas de "quench", c'est-à-dire de retour à l'état normal accidentel ou non de la partie supraconductrice.

Enfin, il est bien évident que les bobines décrites précédemment pourront trouver de nombreuses applications dans les domaines de la génération de champs
25 magnétiques à des fins expérimentales, ou de l'imagerie à résonance magnétique nucléaire par exemple, et que les exemples que l'on vient de donner ne sont que des illustrations particulières en aucun cas limitatives quant aux domaines d'application de l'invention.

REVENDICATIONS

- 1 - Procédé de fabrication d'une bobine apte à générer un champ magnétique dit champ intense lorsqu'elle est traversée par un courant électrique
5 comportant une étape de formation de spires dans un tube obtenu dans un matériau conducteur et/ou supraconducteur caractérisé en ce qu'il comprend au moins une étape de formation d'au moins un renforcement dans une arête d'au moins une spire de ladite bobine, ledit renforcement formant un passage entre l'intérieur et l'extérieur du tube.
- 10 2 - Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'étape de formation d'au moins un renforcement comprend la formation d'au moins un premier renforcement dans une arête d'au moins une spire de ladite bobine et d'au moins un deuxième renforcement dans une arête d'une spire adjacente de manière à ce que le premier renforcement fasse face au deuxième renforcement, les premier et
15 deuxième renforcements ménagés dans les spires adjacentes formant le passage entre l'intérieur et l'extérieur du tube.
- 3 - Procédé selon la revendication précédente caractérisé en ce qu'il comprend en outre la formation d'au moins un bossage sur la spire comprenant le premier renforcement et la formation d'au moins un creux sur la spire comprenant le
20 deuxième renforcement de manière à ce que le bossage s'étende au droit dudit creux, permettant de reprendre les efforts mécaniques induits par les forces électromagnétiques et les forces mécaniques d'origine thermique.
- 4 - Procédé selon la revendication précédente caractérisé en ce que le premier renforcement est formé dans l'arête de la spire au niveau du profil en forme
25 de bossage et le deuxième renforcement est formé dans l'arête de la spire au niveau du profil en forme de creux.
- 5 - Procédé selon la revendication précédente caractérisé en ce que les formations du bossage et du premier renforcement sont faites de manière concomitante, et en ce que les formations du creux et du deuxième renforcement
30 sont faites de manière concomitante.
- 6 - Procédé selon l'une des revendications 3 à 5 caractérisé en ce qu'il comporte une étape préalable d'optimisation du ou des bossages et du ou des creux correspondants, et des renforcements.
- 7 - Procédé selon la revendication 6 caractérisé en ce que l'étape
35 d'optimisation consiste au moins dans les étapes suivantes de :

- détermination d'un maillage des spires, du ou des bossages et du ou des creux correspondants, et des renforcements,
 - simulation des échauffements thermiques et/ou des champs électromagnétiques à partir du maillage,
 - 5 - comparaison des échauffements thermiques et/ou des champs électromagnétiques avec ceux d'un maillage dit de référence ne comportant pas de bossages et/ou ne comportant pas de renforcements,
 - comparaison des déplacements sous les chargements électromagnétiques et thermiques des spires avec ceux d'un modèle dit de référence ne comportant
 - 10 pas de bossages et/ou ne comportant pas de renforcements.
- 8 - Procédé selon l'une quelconque des revendications 3 à 6 caractérisé en ce que les spires, les bossages et les creux correspondants, et les renforcements sont formés par une découpe d'un tube cylindrique suivant une ligne de coupe globalement hélicoïdale.
- 15 9 - Procédé selon la revendication 8 caractérisé en ce qu'un matériau isolant est déposé dans la ligne de découpe entre deux spires adjacentes.
- 10 - Bobine apte à générer un champ magnétique dit champ intense lorsqu'elle est traversée par un courant électrique, ladite bobine (1) comprenant au moins d'un tube (2) ou d'un ensemble de tubes obtenu dans un matériau conducteur
- 20 et/ou supraconducteur et découpé suivant une ligne de découpe pour former des spires (3), caractérisée en ce qu'au moins une spire (3) comporte au moins un renforcement (10) formé dans une arête de ladite spire (3), ledit renforcement (10) formant un passage entre l'intérieur et l'extérieur du tube (2).
- 11 - Bobine selon la revendication 10 caractérisée en ce qu'au moins une
- 25 spire (3) comporte au moins un premier renforcement (10) formé dans une arête de ladite spire et faisant face à un deuxième renforcement (11) formé dans une arête d'une spire (3) adjacente, les premier (10) et deuxième (11) renforcements ménagés dans les spires adjacentes formant le passage entre l'intérieur et l'extérieur du tube (2).
- 12 - Bobine selon la revendication 11 caractérisée en ce que la spire (3)
- 30 comprenant le premier renforcement (10) comprend en outre au moins un bossage (5) s'étendant au droit d'un creux (6) de forme correspondante formé dans la spire (3) adjacente comprenant le deuxième renforcement (11), les premier (10) et deuxième (11) renforcements étant formés dans l'arête des spires (3) correspondantes au
- 35 niveau du profil en forme de bossage (5) et de creux (6) respectivement.

13 - Bobine selon la revendication 12 caractérisée en ce que les bossages (5) adjacents d'une spire (3) sont décalés angulairement.

14 - Bobine selon l'une quelconque des revendications 12 ou 13 caractérisée en ce qu'elle comporte une pluralité de bossages (5) et de creux (6) dont la concavité
5 est orientée dans une même direction.

15 - Bobine selon l'une quelconque des revendications 12 ou 13 caractérisée en ce qu'elle comporte une pluralité de bossages (5) et de creux (6) et en ce que la concavité d'au moins un bossage (5) présente une orientation opposée à l'orientation de la concavité d'au moins un second bossage (5).

10 16 - Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 à 15 caractérisée en ce que chaque renforcement (10,11) présente une forme générale hémicirculaire ou triangulaire ou carrée ou rectangulaire ou trapézoïdale.

17 - Bobine selon l'une des revendications 10 à 16 caractérisée en ce que les spires (3) comprennent plusieurs renforcements, les renforcements adjacents d'une
15 spire (3) étant décalés angulairement.

18 - Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 à 17 caractérisée en ce qu'elle comporte un matériau isolant comblant au moins partiellement la ligne de découpe (4), au moins un renforcement étant ménagé dans une arête de spire en regard dudit matériau isolant.

20 19 - Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 à 18 caractérisée en ce qu'elle est obtenue dans un matériau supraconducteur massif.

20 - Bobine selon l'une quelconque des revendications 10 à 19 caractérisée en ce qu'elle comprend en outre un ruban ou fil formé dans un matériau supraconducteur, ledit ruban ou fil étant fixé sur la face interne et/ou externe du tube
25 (2).

21 - Application de la bobine suivant l'une quelconque des revendications 10 à 20 à un aimant supraconducteur.

22 - Application de la bobine suivant l'une quelconque des revendications 10 à 20 à une bobine de gradient solénoïdale d'une machine à résonance magnétique
30 nucléaire.

1/3

Fig. 1

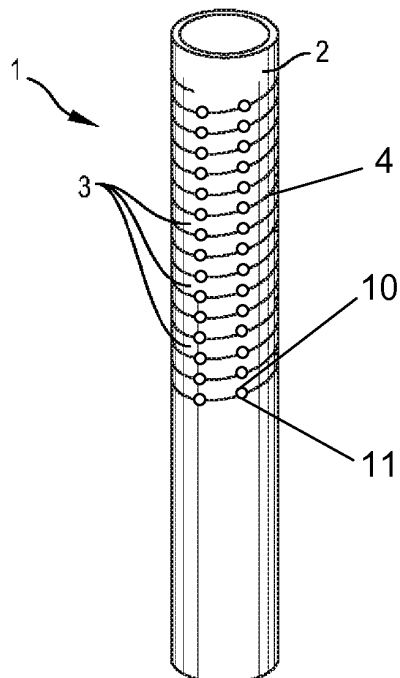
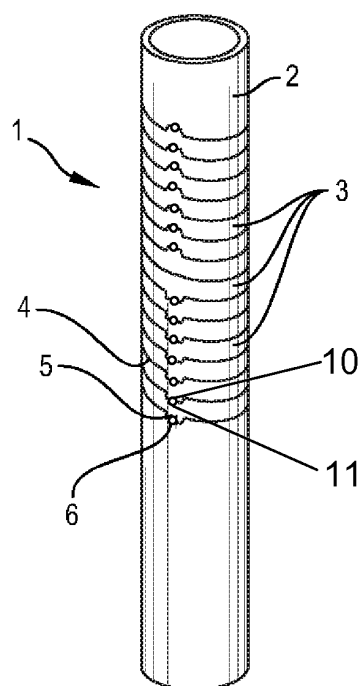


Fig. 2



2/3

Fig. 3

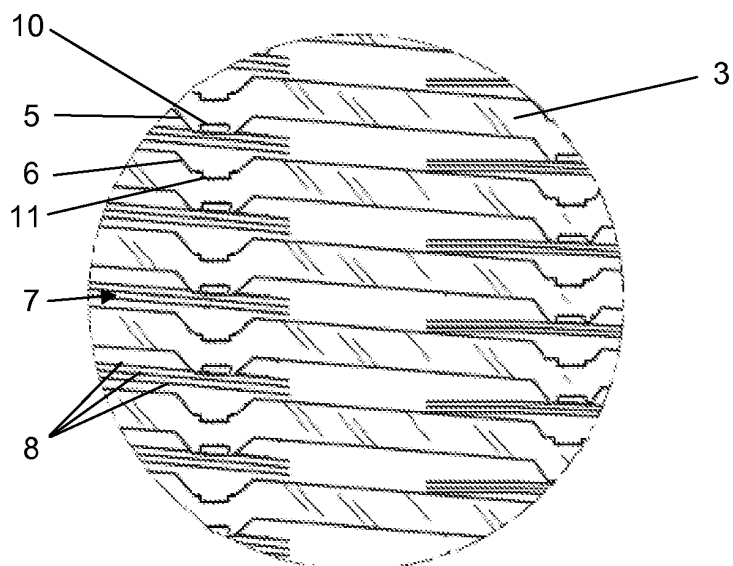
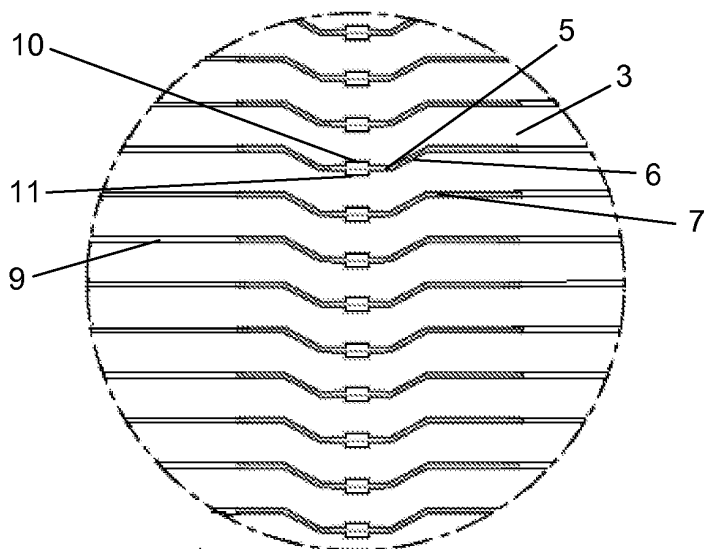
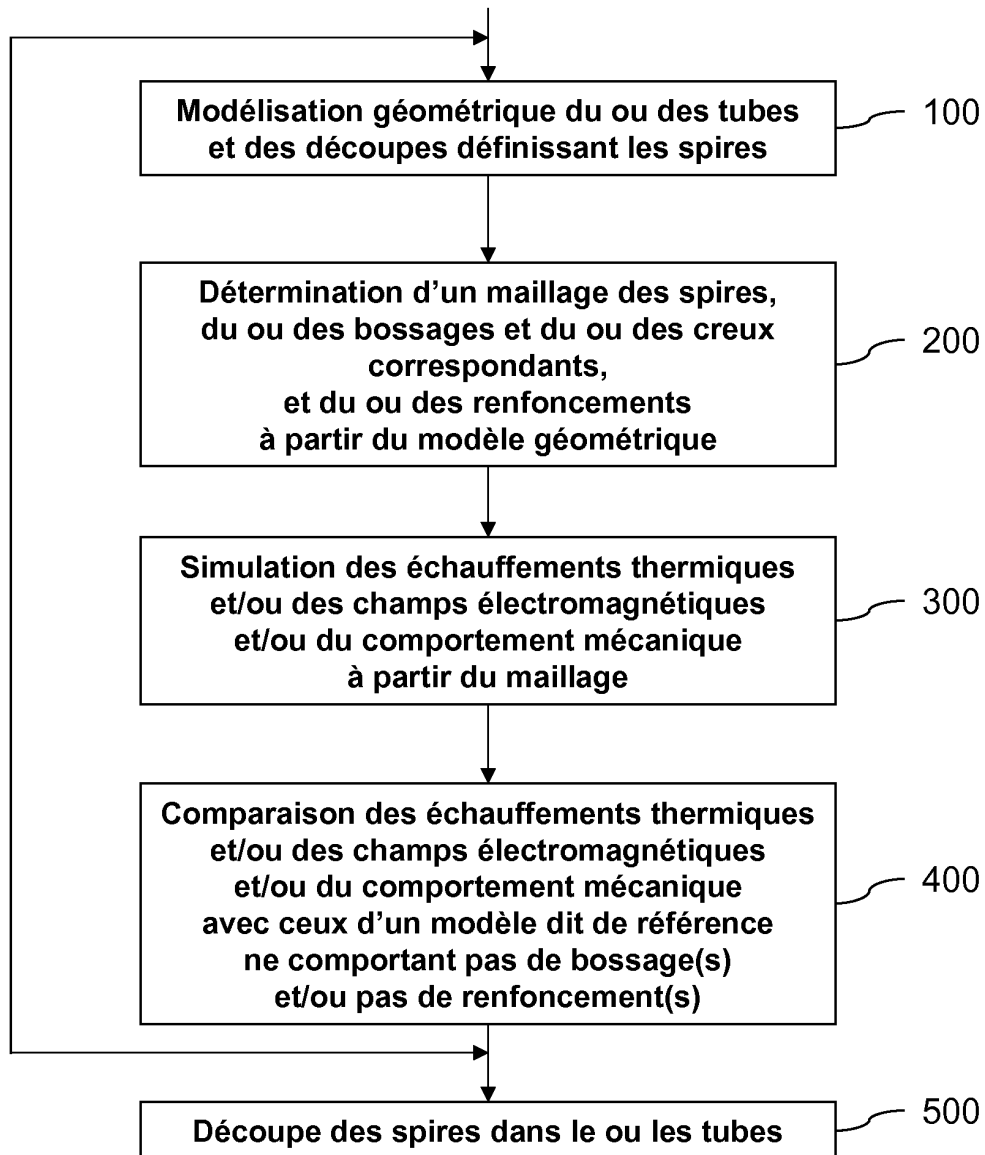


Fig. 4



3/3

Fig. 5





RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 740189
FR 1052952

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	WO 2009/053420 A1 (CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]; DEBRAY FRANCOIS [FR]; PFISTER ROLF [FR];) 30 avril 2009 (2009-04-30) * abrégé * * page 8, ligne 20-27; figures 1-6 * -----	1-22	H01F41/04 H01F6/06
X	US 3 466 743 A (PUY ROBERT P DE) 16 septembre 1969 (1969-09-16) * abrégé * * colonne 2, ligne 52 - colonne 3, ligne 48 * * colonne 3, ligne 69 - colonne 4, ligne 2; figures 1-3 * -----	1,2, 10-12,16	
X	US 2 592 802 A (EDWARD HARROLD ARTHUR) 15 avril 1952 (1952-04-15) * abrégé * * colonne 2, ligne 13 - colonne 3, ligne 20 * * figures 1-3 * -----	1-5, 9-12,15, 16,18	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H01F G01R
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
14 février 2011		Winkelman, André	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1052952 FA 740189

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **14-02-2011**
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2009053420 A1	30-04-2009	CN 101911220 A	08-12-2010
		EP 2208209 A1	21-07-2010
		FR 2923073 A1	01-05-2009
		KR 20100087701 A	05-08-2010
		US 2010271165 A1	28-10-2010

US 3466743 A	16-09-1969	AUCUN	

US 2592802 A	15-04-1952	AUCUN	
