

Description

[0001] La présente invention concerne une antenne notamment pour émettre dans une bande de fréquence longue ou moyenne comprise entre 10 kHz environ et 3 MHz environ, soit en ondes kilométriques ou hectométriques, par exemple pour la diffusion de programme radiophonique numérique.

[0002] Actuellement, des pylônes rayonnants isolés de très grande hauteur de l'ordre de 20 à 350 mètres sont bien souvent installés loin des villes pour émettre des signaux dans la bande des ondes hectométriques avec une puissance d'émission relativement élevée. Si l'on souhaite installer un pylône rayonnant à proximité d'une agglomération ou en ville, un important périmètre de sécurité doit être disponible pour dresser le pylône rayonnant et installer le réseau de terre filaire associé au pylône et placé sur le sol ou à une faible profondeur dans le sol.

[0003] Toutefois, l'avenir des grands pylônes rayonnants à proximité des villes ou dans celles-ci est compromis pour des raisons de compatibilité électromagnétique. Les couplages entre la partie érigée du pylône et les diverses structures métalliques pouvant être situées à proximité du pylône, telles que des armatures métalliques dans des bâtiments, des réverbères métalliques et des pylônes de lignes de transport d'énergie électrique constituent des sources de courant induits, difficilement acceptables par les administrations autorisant l'installation d'antennes.

[0004] Outre l'aspect inesthétique des grands pylônes rayonnants, le contexte d'exposition du public au champ électromagnétique émis par les grands pylônes rayonnants nécessite d'obtenir un terrain relativement vaste pour l'emplacement de chaque pylône. Tous ces inconvénients sont autant d'obstacles à l'installation d'un pylône rayonnant en zone urbaine.

[0005] Par conséquent, puisqu'un grand pylône rayonnant est visible de loin, et donc ne s'intègre pas dans le paysage urbain et génère essentiellement un champ d'onde d'espace qui est une source de couplage avec les édifices et bâtiments érigés dans sa proximité, la plupart des pylônes rayonnants sont installés en dehors des agglomérations. Un pylône rayonnant des programmes radiophoniques est ainsi installé en dehors d'une ville, et donc très éloigné des récepteurs des auditeurs, ce qui l'empêche d'être efficace avec des petites puissances d'émission.

[0006] La présente invention a pour **objectif** de fournir une antenne de sol qui est destinée à rayonner en ondes sensiblement kilométriques ou hectométriques, qui est moins coûteuse et n'offre pas les contraintes précédentes, en particulier qui est quasiment invisible depuis son environnement immédiat et s'intègre bien dans le paysage et qui favorise la propagation d'une onde de sol.

[0007] Pour atteindre cet objectif, une antenne de sol, comprenant un plan de masse, une boucle d'excitation

métallique ouverte entre deux extrémités et s'étendant sensiblement parallèlement au plan de masse, et un élément de liaison métallique sensiblement perpendiculaire à la boucle et reliant l'une des extrémités de la boucle d'excitation au plan de masse, est caractérisée en ce que pour rayonner une onde de sol kilométrique ou hectométrique, le plan de masse est enfoui sensiblement horizontalement à proximité et sous la surface du sol, la boucle d'excitation s'étend sensiblement horizontalement au-dessus de la surface du sol à une hauteur supérieure à 2 m environ par rapport au plan de masse et la boucle d'excitation et l'élément de liaison sont constitués chacun par au moins un élément cylindrique mince.

[0008] La discontinuité entre l'air et le sol, située sur et dans le sol à la périphérie de l'antenne, entre le couple sol et plan de masse métallique, d'une part, et le sol sans le plan de masse métallique, d'autre part, favorise uniquement la propagation d'une onde de sol omnidirectionnelle en polarisation verticale. L'ouverture de la boucle d'excitation est très petite par rapport à la longueur de la boucle, dans un rapport de 1/50 environ à 1/100 environ, pour sensiblement éliminer toute composante de champ électrique horizontale à la surface du sol. L'onde de sol est due à l'injection de courants élevés dans le sol, conséquence d'une résistance ohmique de l'antenne faible, sans aucun rayonnement latéral d'une onde d'espace comparativement à une antenne pylône, l'antenne exploitant un mode de rayonnement magnétique et non électrique pour des ondes sensiblement kilométriques ou hectométriques. Contrairement à des émissions en modulation de fréquence, l'onde de sol, et non une onde d'espace, transporte un signal utile numérique ou analogique vers des récepteurs. La quasi-absence de composante d'onde d'espace sur la surface du sol résout avantageusement des problèmes de compatibilité électromagnétique et d'exposition des personnes, et de couplages de l'antenne avec des structures proches de l'antenne au-dessus du sol.

[0009] Cependant, comme on le verra par la suite, une onde d'espace exploitable particulièrement pour des diffusions ionosphériques nocturnes d'une portée plus grande, à partir d'environ une trentaine de kilomètres, est générée par l'antenne de l'invention en direction d'un axe zénithal central à l'antenne.

[0010] Grâce au plan de masse enfoui dans le sol à quelques dizaines de centimètres et à la boucle d'excitation suspendue de 1 à 3 mètres environ au-dessus du sol, l'antenne de sol selon l'invention est très discrète et ainsi insensible à tout vent violent, souffle, foudre, séisme ou explosion. L'antenne ne présente quasiment pas de surface écho radar (SER).

[0011] L'antenne comprend également un moyen d'alimentation en puissance ayant des bornes reliées respectivement à la boucle d'excitation et au plan de masse à une distance de l'élément de liaison le long de la boucle d'excitation telle que l'impédance de la boucle d'excitation ramenée depuis l'élément de liaison soit

sensiblement égale à l'impédance caractéristique du moyen d'alimentation en puissance de manière à adapter l'antenne à l'impédance caractéristique du moyen d'alimentation en puissance. La faiblesse du rayonnement en onde d'espace au niveau du sol autorise à augmenter la puissance du moyen d'alimentation pour augmenter la puissance rayonnée en onde de sol par l'antenne, tout en respectant les réglementations actuelles en matière de propagation d'onde d'espace.

[0012] Afin de confiner le rayonnement de l'antenne de sol suivant au moins une direction et ainsi conférer une directivité à l'antenne, un moyen, tel que des fossés dans le sol et/ou des protubérances sur le sol qui peuvent être au moins partiellement métalliques, est placé sensiblement en périphérie du plan de masse et à proximité du sol pour confiner du rayonnement électromagnétique de l'antenne respectivement suivant au moins une direction prédéterminée le long du sol.

[0013] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante de plusieurs réalisations préférées de l'invention, données à titre d'exemples non limitatifs, en référence aux **dessins** annexés correspondants dans lesquels :

- la figure 1 est une vue de face verticale schématisant d'une antenne selon une réalisation préférée de l'invention ;
- la figure 2 est une vue de dessus de la boucle d'excitation de l'antenne montrée à la figure 1 ;
- la figure 3 est une vue de côté verticale détaillée d'un poteau isolant supportant la boucle d'excitation ;
- la figure 4 est une vue schématisant en perspective d'une cage de plusieurs fils métalliques parallèles pour la boucle d'excitation ou pour un élément de liaison métallique selon une variante de l'antenne ;
- la figure 5 est une vue de dessus en perspective de l'élément de liaison de la boucle d'excitation à un plan de masse de l'antenne selon l'invention ;
- la figure 6 montre schématiquement des composantes de champ électrique dans une ligne équivalente à l'antenne selon l'invention ; et
- la figure 7 est un schéma analogue à la figure 1 pour adapter la connexion d'un émetteur à l'antenne en fonction de l'impédance caractéristique de l'émetteur.

[0014] En référence aux figures 1 et 2, une **antenne** de sol selon l'invention rayonnant avec une longueur d'onde utile λ , d'émission ou de réception, sensiblement kilométrique ou sensiblement hectométrique comprend essentiellement un plan de masse métallique 1 sensiblement horizontal, une boucle d'excitation métallique ouverte (ou fermée) sensiblement horizontale 2, et un élément de liaison métallique 3, sensiblement vertical, reliant la boucle d'excitation au plan de masse.

[0015] Le **plan de masse** 1 est enfoui à proximité et

sous la surface du sol S à une épaisseur de terre e de quelques dizaines de centimètres, typiquement 40 cm environ sous la surface du sol. Par exemple, le plan de masse est recouvert de terre, y compris de tout arrangement décoratif comme une pelouse ou un parterre de végétaux. Le plan de masse occupe une surface au sol de quelques centaines de mètres carrés à quelques dizaines de milliers de mètres carrés. Le contour du plan de masse est régulier et peut être sensiblement circulaire ou polygonal régulier, par exemple carré avec un côté supérieur à 5 m environ.

[0016] Le plan de masse 1 est métallique et doit assurer une excellente continuité électrique entre les éléments qui le compose afin qu'il contribue au caractère omnidirectionnel de l'antenne, être de construction aisée et donc peu onéreuse, et être insensible aux attaques chimiques dans le milieu naturel qu'est la terre. Selon une première réalisation, le plan de masse est constitué de tôles soudées. Les tôles sont ancrées directement dans la terre et sont soudées ou liées par attaches métalliques les unes aux autres afin d'assurer une excellente continuité électrique entre les tôles et la terre. Selon une deuxième réalisation, le plan de masse est un treillis métallique. Le treillis est composé de fils de fer avec des mailles par exemple carrées ayant un côté petit par rapport à la longueur d'onde utile λ , par exemple compris entre $\lambda/20$ environ et $\lambda/10$ environ. Le treillis métallique peut être aussi formé au moins partiellement par des armatures noyées dans du béton, par exemple le béton armé d'une dalle ou de toute autre structure souterraine existante ou à construire. Le plan de masse 1 peut être par exemple en cuivre ou en aluminium, ou en un alliage ayant pour composant essentiel du cuivre ou de l'aluminium.

[0017] La **boucle d'excitation** métallique ouverte (ou fermée) 2 s'étend sensiblement horizontalement au-dessus de la surface du sol S à une hauteur h et au-dessus du plan de masse 1 à une hauteur H. La hauteur H est en général supérieure à 2 m environ et la hauteur h est déduite de H-e. Pour les longueurs d'ondes kilométriques et hectométriques, la boucle d'excitation 2 a une longueur supérieure à 25 m environ. De préférence, la forme de la boucle 2 est semblable au contour régulier du plan de masse 1 et peut être ainsi circulaire, elliptique, rectangulaire, losangique, ou polygonale régulière, par exemple carrée avec un côté C supérieur à 5 m environ, comme illustré dans la figure 2. Cependant la forme de la boucle, comme le contour du plan de masse, n'est pas limitée aux formes précitées et est déterminée en fonction de la pureté de la polarisation et l'omnidirectivité que l'on souhaite pour l'antenne. La boucle et le plan de masse sont superposés de telle manière qu'ils soient centrés sur un axe commun vertical VV. La boucle d'excitation 2 a une longueur L_2 sensiblement égale à un multiple de quart de la longueur d'onde utile λ de l'antenne.

[0018] Selon la réalisation en mode quart d'onde illustrée à la figure 2, la boucle 2 est carrée avec des côtés

C long de $\lambda/16$ environ. L'un des côtés de la boucle 2 est plus court de manière à ménager une ouverture 21-22 par exemple à proximité de l'un des sommets de la boucle lorsqu'elle est polygonale. L'ouverture 21-22 peut être pratiquée n'importe où le long du contour régulier dont la boucle est issue. La longueur LO de l'ouverture 21-22 est un compromis entre une ouverture trop étroite qui engendre des potentiels trop importants aux extrémités de la boucle qu'il faudrait évacuer et une ouverture trop large qui ne ramène peu de courant circulant dans la boucle de l'une 21 de ses extrémités vers l'autre 22 au détriment du caractère omnidirectionnel de l'antenne.

[0019] Selon un exemple en mode quart d'onde aux dimensions duquel on se référera par la suite, une antenne de sol conforme à l'invention pour émettre des ondes hectométriques autour de $\lambda = 309,6$ m environ, soit dans une bande de fréquence utile centrée sur une fréquence d'environ $F = 969$ kHz et de largeur limitée entre 5 kHz environ et 10 kHz environ, est longue de $L_2 = \lambda/4 = 4C - LO = 4 * 19,6 - 1 = 77,4$ m et carrée avec des côtés C long de $\lambda/16$ environ, soit typiquement de 19,6 m. L'ouverture 21-22 a ici une longueur LO d'un mètre, et le côté de la boucle aligné avec l'ouverture a une longueur de 18,6 m.

[0020] Comme montré aux figures 1 et 3, la boucle d'excitation 2 est soutenue dans un plan horizontal au-dessus du sol S à la hauteur h par des poteaux isolants sensiblement verticaux 4 qui sont régulièrement répartis le long de la boucle, par exemple tous les 4 m à 5 m. Chaque poteau 4 est par exemple en bois ou en matière plastique. Une extrémité supérieure du poteau peut être rainurée pour y poser et attacher la boucle d'excitation par un collier. Une extrémité inférieure du poteau traverse un regard en béton 41 reposant sur le sol S et est logée dans un tube 42 en matière plastique telle que PVC qui est scellé dans un pied en béton 43 coulé dans le sol et ayant une hauteur supérieure à l'épaisseur e, par exemple de 1,2 m, et traverse ainsi le plan de masse 1.

[0021] La boucle d'excitation 2 est réalisée de préférence en un tube métallique galvanisé de diamètre D. De même, l'élément de liaison 3 est une tige tubulaire métallique galvanisée ayant une hauteur H supérieure à 2 m environ. Les diamètres de section transversale, c'est-à-dire le diamètre D du tube de la boucle d'excitation 2 et le diamètre d du tube de l'élément de liaison 3, sont compris entre 5 cm environ et 20 cm environ, et peuvent être identiques. Selon l'exemple précité, la boucle d'excitation et l'élément de liaison sont en tube d'acier de diamètre $D = d = 60$ mm environ. Les diamètres D et d peuvent être égaux et sont d'autant plus grands que la bande passante de l'antenne doit être large. Les tubes sont par exemple en acier, ou de préférence en un meilleur conducteur, par exemple en cuivre ou en aluminium, ou en un alliage ayant pour composant prépondérant du cuivre ou de l'aluminium.

[0022] En variante, la boucle d'excitation 2 est cons-

tituée de plusieurs tubes superposés ou parallèles, distants de quelques dizaines de centimètres afin de permettre une puissance plus élevée, une bande passante améliorée et une diminution des pertes. Les longueurs et les diamètres des tubes superposés ou parallèles peuvent être très légèrement différents afin d'assurer un accord décalé permettant l'élargissement de la bande passante en mode pair ou impair. En particulier dans le mode pair (demi-onde), les deux extrémités 21 et 22 de la boucle sont refermées sur la masse avec des liaisons à celle-ci légèrement différentes.

[0023] En variante, la boucle d'excitation 2 et l'élément de liaison 3 pourrait être plus minces et réalisés chacun sous la forme d'un fil métallique ou d'une nappe de fils métalliques, ce qui conduirait à diminuer la bande passante de l'antenne.

[0024] Selon une autre variante représentée à la figure 4, afin de permettre une puissance d'émission relativement élevée et diminuer les pertes électriques, la boucle d'excitation 2 et l'élément de liaison 3 sont chacun sous la forme d'une cage de diamètre D, d composée de plusieurs fils métalliques parallèles 23 équirépartis circulairement ayant un diamètre compris entre 0,6 mm environ et 1,2 mm environ. La cage constituant la boucle d'excitation 2 comporte des anneaux métalliques 24 soudés aux fils répartis régulièrement sur sa longueur, par exemple tous les 5 m à 10 m, pour maintenir les fils 23 parallèles et équidistants deux à deux et ainsi conserver la distribution équipotentielle en section circulaire dans la cage. A diamètres respectifs identiques D, d, les cages sont avantageusement plus légères que les tubes et l'ensemble des fils des cages est moins onéreux que les tubes. Cette variante ne diminue pas les performances de l'antenne et en particulier permet d'atteindre des puissances d'émission supérieure à 5 kW tout en garantissant une bande passante relativement large.

[0025] L'élément de liaison 3 a une extrémité supérieure 31 soudée à l'une 21 des extrémités de la boucle d'excitation 2. Une extrémité inférieure 32 de l'élément de liaison est soudée au plan de masse 1, par exemple par l'intermédiaire d'une petite plaque en laiton 11 soudée à sur quelques mailles du plan de masse lorsque celui-ci est un treillis, comme montré à la figure 5.

[0026] Selon l'exemple précité, la hauteur de l'élément de liaison est de $H = 2,9$ m, et la boucle d'excitation est à une hauteur $h = H - e = 2,5$ m au-dessus du sol S. L'enfouissement du plan de masse 1 dans le sol S sous-jacent à la boucle d'excitation 2 légèrement au-dessus du sol rend l'antenne de sol selon l'invention quasiment invisible et discrète notamment en milieu urbain, comparativement à une antenne pylône.

[0027] L'antenne de sol ainsi décrite, en quart d'onde et mode impair, est sensiblement équivalente à une ligne quart d'onde de grandes dimensions qui rayonne omnidirectionnellement une onde de sol de polarisation verticale dans un rayon de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres en fonction de la puissance

de quelques kilowatts à quelques dizaines kilowatts d'un **moyen d'alimentation** en puissance de l'antenne. Ce dernier comprend principalement un émetteur 5 installé sur le sol, à proximité du plan de masse 1 et de la boucle d'excitation 2, par exemple pour émettre des programmes de radiodiffusion à travers l'antenne, et un câble d'alimentation. Comme montré schématiquement à la figure 1, deux fils 51 et 52 du câble d'alimentation relient des bornes négative et positive de l'émetteur 5 respectivement au plan de masse 1 et à la boucle d'excitation 2 à une petite distance prédéterminée ℓ de l'élément de liaison 3 le long de la boucle d'excitation telle que la partie réelle de l'impédance de l'antenne ramenée aux bornes de l'émetteur soit sensiblement égale à l'impédance caractéristique du moyen d'alimentation en puissance.

[0028] En outre, la faible impédance de l'antenne de sol dont la partie réelle est de l'ordre de 1 à 2 ohms environ, est compatible avec un amplificateur à l'état solide en sortie de l'émetteur 4 dont l'impédance de sortie est faible.

[0029] Typiquement l'antenne de sol avec les dimensions précitées rayonne un champ électrique supérieur à 2 mV/m dans un rayon de portée de 5 km environ avec une puissance d'émetteur de 10 W et dans un rayon de portée de 20 km à 50 km environ avec une puissance d'émetteur de 5 kW.

[0030] Le **mode de fonctionnement** de l'antenne de sol selon l'invention repose sur l'excitation du sol par la boucle d'excitation métallique ouverte 2 en quart d'onde, piégée entre la surface du sol S et le plan de masse 1 afin de créer une composante de champ électrique normale E_y assurant à l'antenne une polarisation verticale. La boucle d'excitation 2 fait office de source d'excitation linéaire horizontale placée au-dessus du sol et parcourue par un courant parallèle au sol en régime d'onde stationnaire ou progressive selon la largeur de bande de fréquence souhaitée. L'onde de sol générée par l'antenne se trouve guidée par la bande de terre par suite de réflexions multiples sur la surface de séparation entre le diélectrique constitué par la terre et le milieu extérieur constitué par l'air et sur la surface métallique enfouie constituée par le plan de masse 1. Le plan de masse 1 nécessaire pour générer l'onde dans le sol présente de préférence des côtés C qui font sensiblement le double de longueur des côtés de la boucle d'excitation lorsque la boucle et le plan de masse sont carrés ; plus généralement, le plan de masse 1 présente une surface qui est sensiblement le quadruple de la surface circonscrite par la boucle d'excitation 2, ce qui évite des effets de bords de champ électrique entre la boucle d'excitation et le plan de masse et améliore le confinement des lignes de champ électrique sous la boucle d'excitation. Grâce à l'enterrement du plan de masse 1, des lignes de champ électrique sont canalisées au ras du sol S de manière à injecter un courant élevé à haute fréquence dans le sol et ainsi y propager une onde de sol hectométrique, ou kilométrique, porteuse de signal d'émission

utile. L'épaisseur e influence également le fonctionnement de l'antenne particulièrement dans la réactance capacitive de l'antenne.

[0031] En se basant sur l'optique géométrique, on montre que l'antenne de sol est le siège de deux ondes : une onde de surface dans l'air, dite onde évanescente, et une onde guidée, dite onde captive, dans la terre qui est un diélectrique à perte selon la fréquence utile. La résolution des équations de Maxwell pour les deux milieux constitués par l'air et la terre montre que dans chacun des deux milieux :

- une onde transverse électrique TE ne se propage que si la longueur d'onde est inférieure à la longueur d'onde de coupure suivante:

$$\lambda_c = 4 e \sqrt{N^2 - 1}$$

et

- une onde transverse magnétique TM peut exister quelle que soit l'épaisseur e de la terre diélectrique.

[0032] La constante d'atténuation dans la terre diélectrique d'indice de réfraction N est donnée par:

$$\alpha = 4 \pi e (N^2 - 1) / (\lambda N^2).$$

[0033] L'onde évanescente accompagne l'onde captive, et a un grand intérêt pour la diffusion puisqu'elle est perçue à la surface du sol. Elle décroît au-dessus du sol sensiblement de façon exponentielle.

[0034] L'onde captive est une onde guidée dans la terre. Une onde guidée pure ne peut donner lieu à aucun rayonnement sauf si l'onde rencontre toutes sortes de discontinuités comme des changements d'indices de réfraction, de milieux, de dimensions ou d'obstacles. L'évaluation de l'énergie rayonnée peut être effectuée sur un modèle simple constitué de deux milieux d'indices de réfraction N_1 et N_2 et d'atténuation α_1 et α_2 . On montre que le coefficient de transmission T de l'onde de surface à travers la discontinuité, ou en d'autres termes, le rapport T entre les amplitudes dans le milieu N_1 et le milieu N_2 peut s'écrire :

$$T = 2 [(\alpha_1 \alpha_2) / (\alpha_1 + \alpha_2)]^{1/2}.$$

[0035] La présence de la discontinuité provoque alors une perte d'énergie rayonnée que l'on peut évaluer à:

$$D^2 = 1 - T^2 = (\alpha_1 - \alpha_2)^2 / (\alpha_1 + \alpha_2)^2.$$

[0036] L'antenne de sol selon l'invention réside sur ce principe. Comme le montre les équations précédentes, toute variation d'un indice de réfraction N_1 ou N_2 , ou de

l'épaisseur e , provoque une atténuation différente et donc un rayonnement différent. L'antenne selon l'invention exploite la discontinuité entre l'air et le sol et rayonne ainsi grâce à la principale discontinuité, indiquée en D dans la figure 1, créée à la périphérie de l'antenne entre le couple sol et plan de masse métallique et le sol sans le plan de masse métallique. L'invention tire parti de la bonne conduction électrique de la terre, ou du sol en général, aux fréquences basses, pour solliciter le sol comme vecteur de propagation de l'onde de surface et de l'onde guidée.

[0037] Aux longueurs d'onde utiles de l'antenne selon l'invention, seule l'onde transverse magnétique TM est excitée par le courant dans la boucle d'excitation 2 parallèle au sol à quelques mètres. La hauteur H-e par rapport au sol résulte d'un compromis entre un mode de couplage serré et la bande passante souhaitée.

[0038] L'antenne selon l'invention peut être considérée en analyse radioélectrique quelque peu équivalente à une **ligne bifilaire** de longueur L_2 supposée proche du quart d'onde (mode impair) pour la fréquence utile, comme schématisé à la figure 6. L'un des fils de la ligne bifilaire est constitué par la boucle d'excitation 2 et est situé dans l'air au-dessus du sol S. L'autre fil de la ligne bifilaire est constitué par le plan de masse 1 dans le sol. La ligne bifilaire présente donc un milieu sans perte et un milieu avec des pertes : les deux milieux étant différents, il y a naissance d'un déséquilibre dans le mode ligne fondamental de la ligne. Ce déséquilibre ne peut être rétabli que par la présence d'un courant différentiel siégeant à la surface du sol imparfait, mais très bon conducteur de l'onde de sol.

[0039] On rappelle que le champ électrique E d'une onde se propageant à la surface d'un conducteur parfait est perpendiculaire à cette surface, sans composante de champ tangentielle E_x . Le sol n'étant pas parfait, une composante tangentielle supplémentaire E_x apparaît à la surface du sol. Le champ électrique présente ainsi une composante verticale E_y prépondérante à la surface du sol S et la composante tangentielle supplémentaire E_x et devient elliptique dans un plan parallèle à la direction de propagation. La discontinuité du milieu air/sol et la perte dans le sol diélectrique conduisent à l'établissement d'un courant de sol.

[0040] La polarisation verticale est exploitée dans l'antenne selon l'invention, la composante de champ électrique horizontale étant négligeable dans la propagation par l'antenne d'autant plus que la boucle d'excitation 2 est régulière et fermée comme un cercle ou un polygone régulier. Les champs électriques élémentaires E_y sont distribués quasiment uniformément vers tous les azimuts autour de l'axe vertical VV de l'antenne pour assurer l'omnidirectivité de l'antenne.

[0041] Pour satisfaire des conditions de **résonance** de l'antenne de l'invention, l'impédance de rayonnement Z_{ant} de l'antenne doit avoir une partie imaginaire ou réactance nulle, et la longueur L_2 de la boucle d'excitation 2 doit être de l'ordre du quart de longueur d'onde

$\lambda/4$ (mode impair) ou demi-onde $\lambda/2$ (mode pair). Dans le mode de fonctionnement envisagé et en référence à la figure 7, l'impédance de rayonnement de l'antenne étant relativement faible, de l'ordre de quelques ohms, l'impédance de rayonnement Z_{ant} est l'impédance ramenée d'une impédance terminale Z_t à travers les deux parties de l'antenne, la boucle d'excitation horizontale 2 et l'élément de liaison vertical 3, qui ont des impédances caractéristiques propres Z_2 et Z_3 . L'impédance terminale Z_t est placée en bout de ligne à l'extrémité de boucle 22, entre cette extrémité et le plan de masse 1.

[0042] L'antenne est d'abord supposée fonctionner sans charge terminale, soit $Z_t = \infty$.

[0043] La ligne horizontale constituée par la boucle d'excitation 2 de longueur L_2 et de diamètre D, placée à la hauteur H au-dessus du plan de masse métallique, a une impédance caractéristique de :

$$Z_2 = 138 \log(4H/D).$$

L'impédance Z_{21} ramenée à l'extrémité 21 de la ligne horizontale par transformation de l'impédance terminale Z_t est:

$$Z_{21} = Z_2 (Z_t + j Z_2 \operatorname{tg}(\beta L_2)) / (Z_2 + j Z_t \operatorname{tg}(\beta L_2)),$$

soit pour $Z_t = \infty$, $Z_{21} = -j Z_2 \operatorname{cotg}(\beta L_2)$,

avec $\beta = 2\pi/\lambda = 2\pi F/c$, c étant la vitesse de la lumière.

[0044] La ligne verticale constituée par l'élément de liaison 3 de hauteur H et de diamètre d à une impédance caractéristique sensiblement égale à :

$$Z_3 = 60 (2,306 \log(4H/d) - 1).$$

L'impédance ramenée au pied de la ligne verticale par transformation de l'impédance terminale Z_{21} est:

$$Z_{ant} = Z_3 (Z_{21} + j Z_3 \operatorname{tg}(\beta H)) / (Z_3 + j Z_{21} \operatorname{tg}(\beta H)),$$

soit

$$Z_{ant} = Z_3 (-j Z_2 \operatorname{cotg}(\beta L_2) + j Z_3 \operatorname{tg}(\beta H)) / (Z_3 + Z_2 \operatorname{cotg}(\beta L_2) \operatorname{tg}(\beta H)).$$

[0045] La partie imaginaire de l'impédance d'antenne Z_{ant} est annulée par la relation suivante pour satisfaire la condition de résonance de l'antenne:

$$Z_2 \operatorname{cotg}(\beta L_2) = Z_3 \operatorname{tg}(\beta H).$$

[0046] Pour l'exemple d'antenne défini ci-dessus

avec des dimensions de $H = 2,9$ m, $D = d = 0,063$ m et $L_2 = 77,4$ m, les impédances caractéristiques des lignes sont $Z_2 = 312 \Omega$ et $Z_3 = 253 \Omega$, et $\beta L_2 = 87.3^\circ$ est déduit de l'égalité satisfaisant la condition de résonance.

[0047] La **fréquence théorique de résonance** de l'antenne de sol a la valeur suivante qui a été vérifiée par des mesures à quelques kilohertz près:

$$F = c (\beta L_2) / (360^\circ L_2)$$

$$F = 87,3 * 299795 / (360 * 77,4) = 939 \text{ kHz.}$$

[0048] En variante, l'impédance terminale Z_t est réactive ou résistive ou nulle et ferme l'extrémité 22 de la boucle d'excitation 2 et peut être réglable pour ajuster la fréquence de fonctionnement rayonnée par l'antenne. Constituée d'une capacité, l'impédance Z_t abaisse la fréquence de fonctionnement de l'antenne par allongement électrique ; constituée d'une self, l'impédance Z_t augmente la fréquence de fonctionnement. La mise en place d'une charge terminale augmente la bande passante en passant d'un régime d'ondes stationnaires à un régime d'ondes progressives.

[0049] Par exemple, l'impédance terminale Z_t fermant la boucle d'excitation métallique 2 est un court-circuit constitué par un deuxième élément de liaison métallique sensiblement vertical reliant l'extrémité 22 de la boucle d'excitation 2 au plan de masse 1. Les deux extrémités de la boucle d'excitation en quart d'onde sont refermées sur la masse et l'antenne fonctionne en mode pair, comme une ligne demi-onde, avec une bande relativement large d'au moins 10 kHz.

[0050] Pour considérer l'antenne en résonance, la résistance de rayonnement de l'antenne est évaluée par les formules suivantes :

$$R_r = 160 \pi^2 (H / \lambda)^2 = 0,15 \Omega,$$

et la résistance de perte du tube et du plan de masse est estimée à $R_p = 1 \Omega$ selon le matériau utilisé, en l'occurrence l'acier. On en déduit le rendement de l'antenne par la relation :

$$\eta_{\text{ant}} = R_r / (R_r + R_p) = 0,15 / 1,15 = 13 \text{ \%}.$$

[0051] Le choix d'un matériau, tel que le cuivre, meilleur conducteur que l'acier, et d'un diamètre des tubes davantage plus grand pour la boucle d'excitation 2 et l'élément de liaison 3, par exemple $D = d = 160$ mm, améliore nettement le rendement de l'antenne en abaissant la valeur de la résistance de perte R_p .

[0052] L'antenne étant en résonance, l'impédance au niveau de l'élément de liaison vertical 3 est pure et a pour valeur:

$$R_{\text{ant}} = R_r + R_p = 1,15 \Omega.$$

[0053] Pour **adapter l'antenne** à l'impédance caractéristique Z_c du moyen d'alimentation en puissance comportant l'émetteur 5, égale classiquement 50Ω , on cherche le long de la ligne horizontale constituée par la boucle d'excitation 2, à partir du ventre de courant situé à l'extrémité 21, la distance ℓ entre un point P et l'extrémité 21 pour laquelle une admittance ayant pour partie réelle celle souhaitée ($1/Z_c$) et pour partie réactive ($-jX$) est comblée par un stub en parallèle $+jX = jZ_2 \text{tg}(\beta \ell)$. Le stub est composé de la ligne horizontale de faible longueur entre l'extrémité 21 liée à l'élément de liaison vertical 3 dont l'impédance est une faible résistance pure $R_{\text{ant}} = 1,15 \Omega$, et le point P. L'impédance au point P vaut environ $R_{\text{ant}} - jX$.

[0054] En négligeant l'impédance terminale Z_t qui est très faible ramenée au point P proche de l'extrémité 21, l'équation à résoudre est alors la suivante :

$$R_{\text{ant}} - jX = (Z_c // jX),$$

ou

$$R_{\text{ant}} - jX = (Z_c * j Z_2 \text{tg}(\beta \ell) / (Z_c + j Z_2 \text{tg}(\beta \ell))).$$

[0055] Par itérations, la valeur de $Z_2 \text{tg}(\beta \ell)$ est de 8Ω , ce qui correspond approximativement à une longueur ℓ de $1,3$ m sur la ligne horizontale, c'est-à-dire depuis l'extrémité 21 de la boucle d'excitation 2 jusqu'au fil de câble d'alimentation 52 à positionner et brancher.

[0056] La **bande passante** de l'antenne selon l'invention dépend essentiellement d'un circuit comprenant les éléments participant au rayonnement : le plan de masse métallique 1, les tubes 2 et 3, ou les fils ou les cages 23 selon les autres variantes, le sol S et le moyen d'adaptation constitué par le stub de longueur ℓ . Comme le coefficient de surtension Q et la bande passante sont liés, on ramène l'étude à celle du coefficient de surtension:

$$Q = \frac{\text{Puissance Réactive}}{\text{Puissance Active}} = \frac{L \omega}{R_a}$$

[0057] La partie réelle équivalente au circuit est faible, de l'ordre de 1 à 2Ω , ce qui favorise l'injection d'un courant élevé dans le sol, et la partie réactive du circuit est d'autant plus élevée que le tube, ou le fil ou la cage selon les autres variantes, est mince. La mise en place d'un tube de diamètre plus important a pour effet de diminuer la self linéique parasite et de réduire la perte ohmique. D'un côté on augmente la bande passante et de l'autre on améliore le rendement.

[0058] On rappelle qu'un fil conducteur de longueur

L_2 au-dessus du sol ayant une extrémité à la masse a, pour des dimensions exprimées en cm, une inductance exprimée en μH de :

$$L_{\text{fil}} = 0,002[2,3026 \log(4(H)/d) - CT + \mu_r \delta],$$

où CT est une constante dépendant du rapport $2(H)/L_2$, $\mu_r = 1$ la perméabilité magnétique relative et δ dépend de l'effet de peau du métal.

[0059] Selon un exemple, le cuivre compose essentiellement la matière constituant les tubes de la boucle d'excitation 2 et de l'élément de liaison 3. Le cuivre a une résistance linéaire de $1 \Omega / 25 \text{ m}$ lorsqu'il est traversé par une fréquence de 1 MHz pour un périmètre de 1 cm. La résistance linéaire du cuivre est inversement proportionnelle au périmètre, ce qui incite à choisir des diamètres D et d des tubes relativement grands. Ainsi pour $L_2 = 77,4 \text{ m}$, $H = 2,9 \text{ m}$, $CT = 0,07$ et $\delta = 0$, un tube en cuivre de diamètre d ou $D = 63 \text{ mm}$ a une inductance linéaire de $1,04 \mu\text{H/m}$, une inductance totale de $L_{\text{fil}} = 80,5 \mu\text{H}$, et une réactance de $L_{\text{fil}}(\omega) = (2\pi F L_{\text{fil}}) = 475 \Omega$, avec une résistance de perte ohmique de $0,15 \Omega$, et un tube en cuivre de diamètre d ou $D = 160 \text{ mm}$ a une inductance linéaire de $0,85 \mu\text{H/m}$, une inductance totale de $L_{\text{fil}} = 65,8 \mu\text{H}$, et une réactance de $L_{\text{fil}}(\omega) = (2\pi F L_{\text{fil}}) = 388 \Omega$, avec une résistance de perte ohmique $0,06 \Omega$.

[0060] Le coefficient de surtension de l'antenne avec la boucle d'excitation 2 et l'élément de liaison 3 en tube de cuivre est donc très élevé et donc présente une bande passante large de plusieurs kilohertz pour une fréquence de porteuse d'un mégahertz environ, comparativement à des aciers de bonne qualité pour lesquels la conductivité n'excède pas les 15% de celle du cuivre.

[0061] Avantagusement, l'antenne selon l'invention produit, contrairement à une antenne pylône, une **onde d'espace** en mode de rayonnement magnétique et non électrique suivant la direction de l'axe vertical central V-V. L'onde d'espace résulte de l'inégalité des courants dans la ligne constituée par la boucle d'excitation 2 et dans le sol contenant le plan de masse. Cette inégalité empêche à la verticale de l'antenne d'annuler des composantes de champ vraies et des composantes de champ de l'image de la ligne par rapport au miroir constitué par le plan de masse. La puissance de cette onde d'espace plus faible que celle de l'onde de sol peut être accrue en augmentant la puissance de l'émetteur 5 afin de l'exploiter pour une diffusion ionosphérique nocturne de signaux. Cette possibilité de tir zénithal encore appelé "tir à l'africaine" est un atout majeur de l'antenne de l'invention et permet de transmettre une partie de l'énergie rayonnée vers les couches ionosphériques E et F propices à la propagation nocturne à courte distance dans un rayon de portée supérieur à 30 km environ, ce qui est impossible avec les pylônes rayonnants actuels en onde moyenne qui ne rayonne aucune énergie à la verticale.

[0062] En fonction des besoins, la **directivité** de l'an-

tenne peut être accentuée et privilégiée suivant une ou quelques directions prédéterminées par l'installation d'un ou de quelques moyens de confinement placés sensiblement en périphérie du plan de masse et à proximité du sol, c'est-à-dire sur le sol ou dans le sol, pour confiner du rayonnement électromagnétique de l'antenne respectivement suivant ladite une ou lesdites directions prédéterminées. Ces moyens de confinement de rayonnement électromagnétique présentent une permittivité diélectrique relative ϵ_r et/ou une perméabilité magnétique relative μ_r différentes de celles du sol (terre) afin de créer des discontinuités du milieu de propagation au niveau du sol S, en prolongement de la discontinuité D à la périphérie de l'antenne entre le couple sol S et plan de masse métallique 1 et le sol S sans le plan de masse métallique.

[0063] Chaque moyen de confinement de rayonnement comprend un ou quelques obstacles conducteurs au rayonnement électromagnétique et constituant des zones de diffraction équivalentes à des sources de rayonnement ponctuelles suivant la direction prédéterminée respective. Comme représenté à la figure 1 pour une direction prédéterminée vers la droite, des obstacles sont par exemple des fossés 61 qui sont vides ou remplis d'éléments métalliques avec une profondeur comprise entre 50 cm et quelques mètres en fonction de la pénétration de l'onde rayonnée dans le sol. Des obstacles peuvent également jalonnés la surface du sol, comme des protubérances métalliques ou des herbes métalliques 62 de faibles hauteurs sur le sol.

[0064] La distance entre les obstacles ou discontinuités est optimisée si la directivité est très nécessaire : dans ce cas, chaque obstacle est considéré comme une source de rayonnement, et une règle de mise en phase entre les sources de rayonnement est établie, par exemple par le choix d'une distance proche de $\lambda/4$ entre elles.

[0065] On notera que l'antenne de sol selon l'invention été décrite ci-dessus peut être indifféremment une antenne d'émission pour émettre, ou bien une antenne de réception pour recevoir une onde kilométrique ou hectométrique de sol porteuse d'un signal utile, tout en étant discrète et insensible aux parasites extérieurs sur le sol et de l'ionosphère.

Revendications

1. Antenne de sol comprenant un plan de masse (1), une boucle d'excitation métallique (2) ouverte entre deux extrémités (21, 22) et s'étendant sensiblement parallèlement au plan de masse, et un élément de liaison métallique (3) sensiblement perpendiculaire à la boucle et reliant l'une (21) des extrémités de la boucle d'excitation au plan de masse, **caractérisée en ce que** pour rayonner une onde de sol kilométrique ou hectométrique, le plan de masse (1) est enfoui sensiblement horizontalement à proximité et sous la surface du sol (S), la boucle d'excitation (2)

- s'étend sensiblement horizontalement au-dessus de la surface du sol à une hauteur (H) supérieure à 2 m environ par rapport au plan de masse et la boucle d'excitation et l'élément de liaison sont constitués chacun par au moins un élément cylindrique mince.
2. Antenne conforme à la revendication 1, dans laquelle le plan de masse (1) est en tôle.
 3. Antenne conforme à la revendication 1 ou 2, dans laquelle le plan de masse (1) est un treillis métallique.
 4. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 3, comprenant des poteaux isolants sensiblement verticaux (4) pour soutenir la boucle d'excitation (2) au-dessus du sol (S).
 5. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans laquelle la boucle d'excitation (2) a une longueur (L_2) sensiblement égale au quart ou multiple de quart d'onde d'une longueur d'onde utile de l'antenne.
 6. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans laquelle la boucle d'excitation (2) a une longueur supérieure à 25 m environ.
 7. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans laquelle l'ouverture de la boucle d'excitation (2) est très petite par rapport à la longueur de la boucle dans un rapport de 1/50 environ à 1/100 environ avec la longueur de la boucle.
 8. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans laquelle le plan de masse (1) et la boucle d'excitation métallique (2) sont polygonaux réguliers ou circulaires.
 9. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans laquelle la surface du plan de masse (1) est sensiblement le quadruple de la surface circonscrite par la boucle d'excitation (2).
 10. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans laquelle la boucle d'excitation (2) et l'élément de liaison (3) sont essentiellement en cuivre.
 11. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans laquelle la boucle d'excitation (2) et l'élément de liaison (3) sont tubulaires.
 12. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans laquelle la boucle d'excitation (2) et l'élément de liaison (3) sont des cages ou nappes de fils métalliques parallèles (23).
 13. Antenne conforme à la revendication 11 ou 12, dans laquelle la boucle d'excitation (2) et l'élément de liaison (3) ont des diamètres de section transversale (D, d) compris entre 5 cm environ et 20 cm environ.
 14. Antenne conforme à l'une des revendications 1 à 10, dans laquelle la boucle d'excitation (2) est constituée de tubes parallèles très légèrement différents en longueurs et diamètres.
 15. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 14, comprenant une impédance terminale (Z_t) entre l'autre (22) des extrémités de la boucle d'excitation et le plan de masse (1).
 16. Antenne conforme à la revendication 15, dans laquelle l'impédance terminale (Z_t) est réglable pour ajuster une fréquence de fonctionnement de l'antenne.
 17. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 16, comprenant un moyen d'alimentation en puissance ayant des bornes (51, 52) reliées respectivement à la boucle d'excitation (2) et au plan de masse (1) à une distance (ℓ) de l'élément de liaison (3) le long de la boucle d'excitation telle que l'impédance de la boucle d'excitation ramenée depuis l'élément de liaison (3) soit sensiblement égale à l'impédance caractéristique du moyen d'alimentation en puissance.
 18. Antenne conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 17, comprenant un moyen (61, 62) placé sensiblement en périphérie du plan de masse (1) et à proximité du sol (S) pour confiner du rayonnement électromagnétique de l'antenne respectivement suivant une direction prédéterminée le long du sol.
 19. Antenne conforme à la revendication 18, dans laquelle le moyen pour confiner du rayonnement électromagnétique de l'antenne comprend des fossés (61) dans le sol et/ou des protubérances (62) sur le sol.

FIG. 1

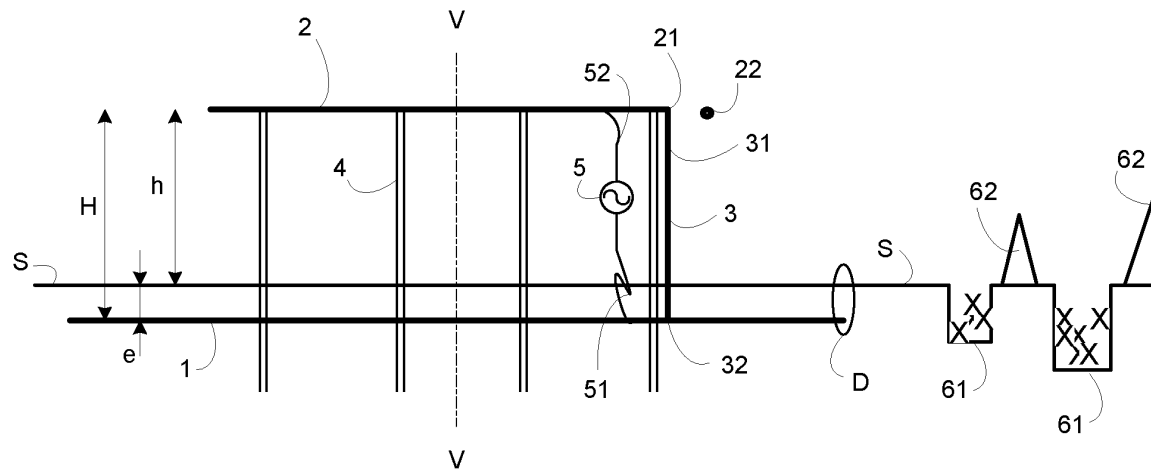


FIG. 2

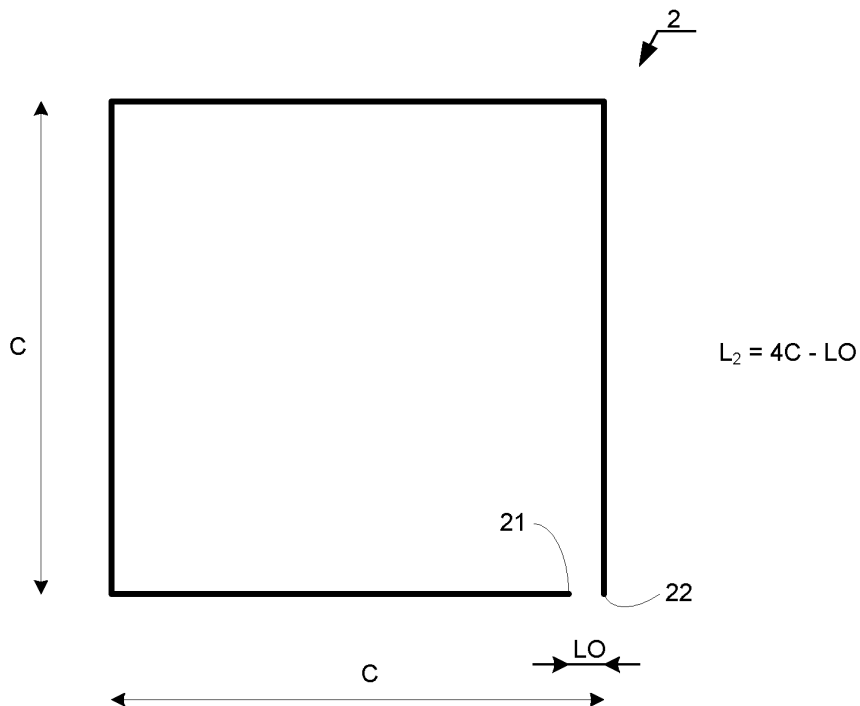


FIG. 3

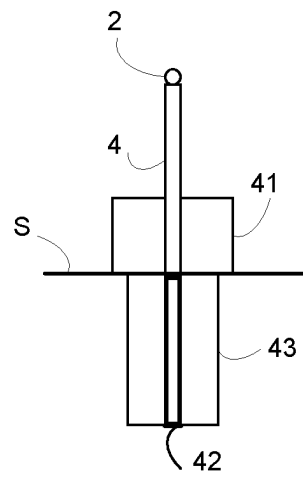


FIG. 4



FIG. 5

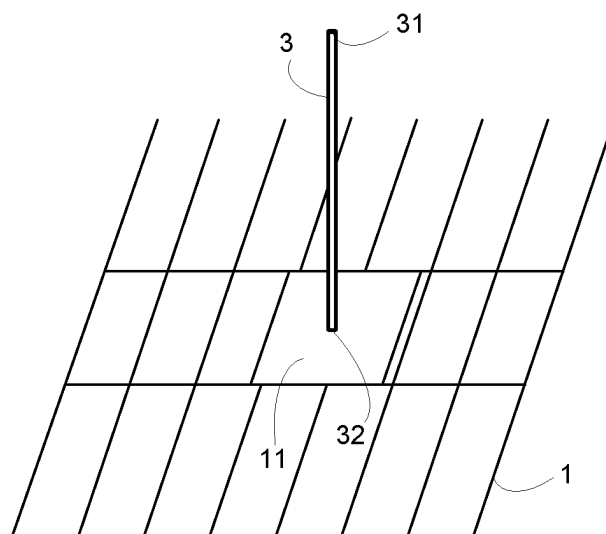


FIG. 6

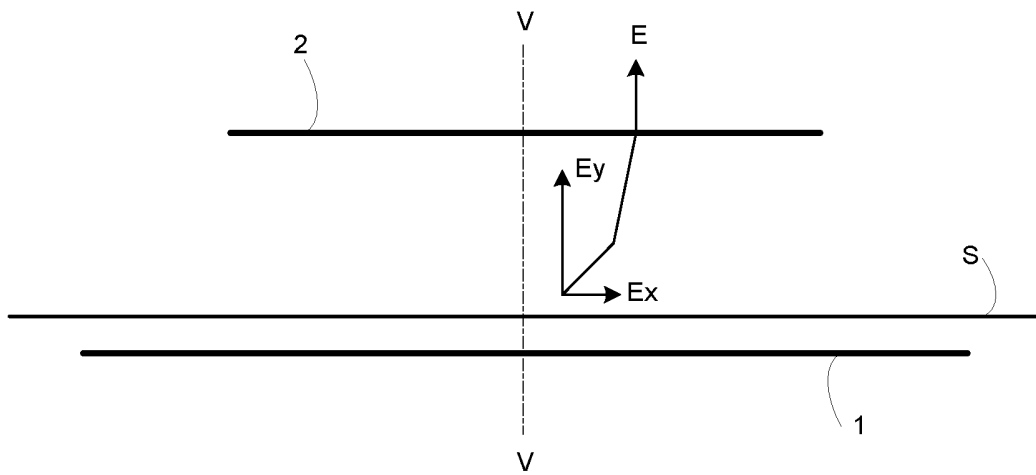
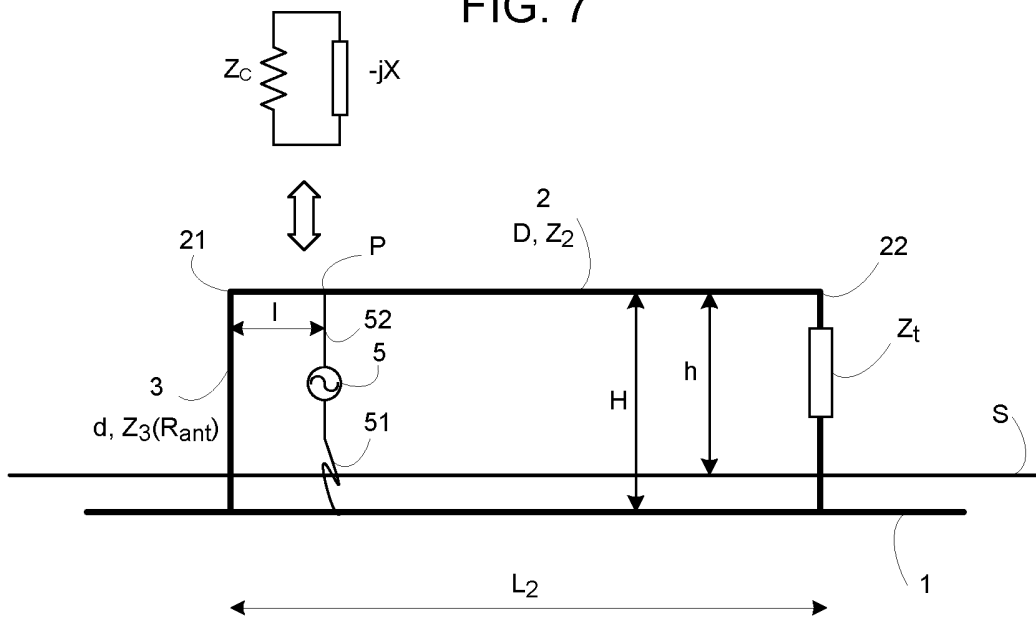


FIG. 7





Office européen
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 05 30 0192

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int.Cl.7)
Y	US 2 746 040 A (ANDREW MARTIN CHARLES) 15 mai 1956 (1956-05-15) * colonne 2, ligne 58 - colonne 3, ligne 48; figure 1 *	1-18	H01Q9/42 H01Q1/04
Y	US 6 542 126 B2 (BAHR ACHIM ET AL) 1 avril 2003 (2003-04-01) * colonne 3, ligne 19 - colonne 5, ligne 6; figure 1 *	1-18	
A	US 3 253 279 A (TANNER ROBERT L) 24 mai 1966 (1966-05-24) * colonne 2, ligne 52-62; figure 1 *	1	
A	US 2003/146874 A1 (KANE JOJI ET AL) 7 août 2003 (2003-08-07) * colonne 6; figure 1 *	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.Cl.7)
			H01Q
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 4 mai 2005	Examineur Ribbe, J
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES 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 antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

2

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 05 30 0192

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.

Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

04-05-2005

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2746040	A	15-05-1956	AUCUN	

US 6542126	B2	27-12-2001	DE 10029733 A1	03-01-2002
			AU 5180801 A	03-01-2002
			EP 1168495 A2	02-01-2002
			HU 0102316 A2	29-04-2002
			JP 2002043833 A	08-02-2002
			US 2001054979 A1	27-12-2001

US 3253279	A	24-05-1966	AUCUN	

US 2003146874	A1	07-08-2003	JP 2002237711 A	23-08-2002
			CN 1419720 A	21-05-2003
			EP 1341257 A1	03-09-2003
			WO 0247202 A1	13-06-2002

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82