

⑤④ Four à induction comprenant un circuit résonant additionnel.

②② Date de dépôt : 30.08.19.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

☐ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public — FR.

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 05.03.21 Bulletin 21/09.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 10.09.21 Bulletin 21/36.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : BRUN Patrice et SAUVAGE Emilien.

⑦③ Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public.

⑦④ Mandataire(s) : BREVALEX.



Description

Titre de l'invention : Four à induction comprenant un circuit résonant additionnel

- [0001] L'invention a pour sujet un four à induction comprenant un circuit résonant additionnel.
- [0002] Elle concerne les fours à creuset froid à chauffage par induction électromagnétique destinés à faire fondre, notamment, au moins un matériau conducteur électrique tel qu'un oxyde ou des mélanges d'oxyde, ou de tels mélanges avec des proportions de métaux allant jusqu'à environ 30% massiques, ces mélanges étant représentatifs des coriums fondus. Elle s'applique aussi en particulier aux fours utilisés dans l'industrie verrière, l'élaboration des émaux ou tout matériau de haute pureté élaboré à haute température, de par exemple 1200 K à plus de 3000 K. La fréquence d'induction est généralement comprise entre 100 kHz et 1000 kHz selon la taille des creusets.
- [0003] Elle doit améliorer les fours à creuset froid en permettant en particulier une meilleure homogénéité de la température de la charge, avec la conséquence possible d'une diminution de l'épaisseur de la croûte sur la sole au fond du creuset, sans impliquer une surchauffe importante du bain liquide du ou des matériaux en fusion ni produire des courants induits, qui seraient néfastes en pouvant perturber les pièces constituant le circuit électrique du ou des inducteurs, notamment les générateurs de courant. Les avantages obtenus sont associés à un meilleur rendement et une meilleure homogénéité thermique ; ils permettent de simplifier l'installation, d'améliorer le brassage du bain liquide par convection et de faciliter la coulée du liquide à travers la sole par gravité.
- [0004] Les fours à induction sont bien connus dans le domaine de la fonderie ou de la métallurgie, ou celui de l'industrie nucléaire pour l'élaboration de matériaux ou la formation de mélanges homogènes. Ils comprennent un creuset dans lequel la charge est maintenue, et au moins un inducteur, dont l'excitation produit des courants dans la charge, qui amènent son chauffage et sa fusion. Ce procédé de chauffage est simple à mettre en œuvre et permet d'éviter tout contact entre la source d'énergie thermique et le creuset.
- [0005] Le creuset comprend typiquement une paroi latérale jointe à une sole pouvant être plate et qui en constitue le fond. S'il est en matériau conducteur de l'électricité, il est souvent sectorisé, c'est-à-dire composé de portions s'étendant sur des secteurs angulaires et séparées par des intercalaires isolants électriques, afin d'y éviter l'apparition de courants induits circulant en boucle autour de la charge et les pertes d'énergie correspondantes.
- [0006] Certains creusets sont construits en un matériau réfractaire tel le pisé ou le graphite.

Leur avantage est une température de fusion élevée, mais certaines charges, notamment composées d'oxydes, doivent être fondues à des températures plus élevées encore, ou du moins suffisantes pour les corroder physiquement ou chimiquement.

[0007] Une conception également très répandue, et que reprend l'invention, est alors celle du creuset froid, équipé d'un circuit de refroidissement par l'eau ou un autre liquide et qui s'étend dans le creuset. Le creuset reste alors beaucoup plus froid que le cœur de la charge pendant le fonctionnement du procédé, et il reste protégé de la corrosion ou d'autres attaques physiques ou chimiques par une couche solidifiée du matériau de la charge qui subsiste contre lui, qu'on peut considérer comme constituant une paroi interne du creuset et qui est appelée auto-creuset. Ces creusets froids permettent de fondre à haute température, au-delà de 1500 K, voire plus de 3000 K par exemple, des matériaux hautement réactifs, qui peuvent être métalliques comme le titane, l'acier ou des alliages divers composés d'oxydes comme le verre, l'oxyde de titane, des terres rares ou un mélange ; ou encore des matériaux peu conducteurs tels que silicium ou les émaux.

[0008] On observe toutefois des défauts d'homogénéité du chauffage dans le creuset. La portion la plus chaude de la charge tend à remonter vers la surface libre par convection. Or les courants induits responsables de l'échauffement tendent à se concentrer dans les portions les plus conductrices de l'électricité, qui correspondent aux portions chaudes pour les charges d'oxydes notamment. La conséquence de cette convection, renforcée éventuellement par le chauffage hétérogène et par une diminution de l'induction électromagnétique près de la sole si elle est métallique, est que la charge est plus difficile à chauffer au fond du creuset, que sa température y reste moins élevée, et que normalement la couche solidifiée est beaucoup plus épaisse sur le dessus de la sole (parfois quelques dizaines de millimètres, au lieu de quelques millimètres en vis-à-vis de la paroi latérale du creuset). Cette difficulté plus grande à procéder à la fusion, associée à des pertes électriques importantes dans les structures refroidies, est dommageable en soi et peut affecter la qualité du procédé. Elle est encore plus gênante quand il est prévu d'évacuer la charge fondue par le fond du creuset, en descendant un bouchon au centre de la sole, plutôt que par un retournement du creuset, délicat à réaliser et souvent exclu. La croûte solidifiée peut en effet empêcher la coulée quand le bouchon a été retiré. Il est envisageable d'augmenter la puissance pour faire fondre cette croûte de fond du creuset et concentrer le chauffage au centre ; mais le risque existe que l'échauffement devienne excessif ailleurs, en augmentant la volatilité de certains oxydes et modifiant ainsi la composition de la charge à fondre, en fondant la couche de charge solidifiée qui couvrait la paroi latérale ou en endommageant certaines structures du creuset, comme les isolants entre secteurs. Les pertes thermiques peuvent aussi être multipliées par un facteur pouvant être de 1,5 ou 2, dans

des procédés déjà caractérisés par des rendements faibles, où les pertes par rayonnement à la surface libre du bain, conduction sur les parois du creuset, et convection avec l'atmosphère environnante sont importantes.

- [0009] On peut aussi agir sur la fréquence d'induction pour tenter d'obtenir cette fusion de la charge au fond du creuset : si l'inducteur est disposé autour de la paroi latérale, ce qui est le plus habituel, la répartition de l'échauffement à l'intérieur du creuset dans la direction radiale dépend de la fréquence d'excitation de l'inducteur : plus elle est importante, plus l'échauffement est localisé en paroi ; il est donc possible de choisir ou d'ajuster cette fréquence d'excitation pour régler le volume du bain fondu et, dans une certaine mesure, la répartition des températures à l'intérieur du creuset ; mais le manque d'homogénéité des températures dans le bain fondu peut devenir inacceptable. En pratique, on surdimensionne en général le circuit électrique ainsi que le système de refroidissement, sans que cet alourdissement du dispositif soit forcément satisfaisant.
- [0010] Ces défauts sont particulièrement marqués dans le cas courant où le creuset froid est en matériau conducteur de l'électricité, comme le cuivre ou certaines nuances d'acier inoxydables, notamment à cause de l'augmentation des pertes électriques dans les structures, mais ils sont présents quels que soient le matériau constituant le creuset et la structure de celui-ci.
- [0011] Un dernier inconvénient des fours à induction les plus simples, décrits jusqu'à présent, qu'on mentionnera ici, est qu'ils sont mal adaptés à des volumes de charge variables, donc de hauteurs différentes à l'intérieur du creuset, si la hauteur de l'inducteur est nettement différente.
- [0012] L'art antérieur illustrant de tels fours à induction est abondant. On s'appesantira maintenant sur certaines conceptions particulières, supposées améliorer l'homogénéité du chauffage.
- [0013] Le document EP 1 045 216 B1 décrit un inducteur supplémentaire, disposé autour de la zone de coulée au-dessous de la sole, autour du bouchon permettant la coulée hors du creuset, en plus de l'inducteur principal entourant la paroi latérale du creuset. Il permet de créer des courants induits supplémentaires autour de l'orifice de coulée traversant la sole, d'y empêcher la solidification de la charge et de garantir la coulée quand le bouchon a été retiré. Il subsiste cependant des difficultés de mise en œuvre, ce dispositif ne convenant pas forcément à la fusion de matériaux à point de fusion très élevé. Son effet est purement local pendant un temps limité, si bien que le problème plus général de manque d'homogénéité de chauffage de la charge à fondre n'est pas résolu. Il en irait de même si on disposait, ce qui a déjà été proposé, un tube métallique non refroidi entre cet inducteur inférieur et l'orifice de coulée avec l'espoir d'obtenir un chauffage plus important grâce au tube ; ce dernier risque d'ailleurs d'être corrodé rapidement, surtout à haute température.

- [0014] Dans certaines conceptions comme celle du document US 6 185 243 B1, l'inducteur plus classique disposé autour de la paroi latérale du creuset est remplacé par un inducteur situé sous la sole et dont la forme peut être celle d'une ou plusieurs spirales. Cette conception convient seulement pour des bains de faible hauteur par rapport au diamètre, et elle peut être associée à des pertes thermiques importantes par convection à la surface libre du bain fondu et par conduction sur la paroi latérale. La puissance fournie reste hétérogène, typiquement importante au-dessus des spires inductrices, mais beaucoup plus faible près de la paroi latérale, et au centre du creuset si les spires y sont absentes.
- [0015] Il a encore été proposé de disposer un inducteur unique s'étendant à la fois autour de la paroi latérale et sous la sole (US-1645526 – A), ou deux inducteurs séparés commandés chacun par une source de puissance (US 4 609 425, JP 10 253 260, US 4 687 646). Les possibilités d'une meilleure égalité de chauffage de la charge sont toutefois contrariées par des antagonismes de champs électriques produits par les deux inducteurs ou partie d'inducteur, qui perturbent leur fonctionnement et peuvent même endommager l'électronique de commande. Un perfectionnement à ces conceptions a été enfin proposé dans le document WO 2017/093165 A1, dans lequel une pièce appelée concentrateur à flux magnétique est placée à la jonction de la paroi latérale et de la sole en séparant ainsi les deux inducteurs. Cette pièce est une pièce statique en matière à perméabilité magnétique élevée, qui réduit donc les interactions entre les champs magnétiques. Les inconvénients précédents sont réduits, et un rendement meilleur peut être espéré. Il faut malheureusement, notamment pour la plage de fonctionnement envisagée ici (celle qui concerne la fréquence d'excitation de la source de puissance), refroidir ce concentrateur à flux magnétique pour qu'il maintienne ses performances, et cela peut être technologiquement difficile dans certaines situations. Le concentrateur doit être placé dans une zone difficile d'accès, en pouvant imposer un déplacement des inducteurs par rapport à la charge ; il est enfin vulnérable aux irradiations dans le cas de charges radioactives. Un inconvénient d'un autre ordre est que ce dispositif ne permet pas de répartir la puissance de chauffage entre les deux inducteurs.
- [0016] L'invention concerne un four à induction perfectionné, dont l'aspect le plus important est qu'il permet à la fois d'augmenter l'efficacité de chauffage de la charge fondue et de régler la répartition de chauffage dans le volume chauffé selon les besoins, grâce à une construction plus favorable de deux inducteurs dont l'un est placé autour de la paroi latérale du creuset et l'autre sous (ou dans) la sole. Des rendements électriques supérieurs à ceux des dispositifs et procédés antérieurs sont espérés. Une meilleure facilité de coulée est aussi attendue grâce à une meilleure efficacité de chauffage dans le fond du creuset.

- [0017] Elle concerne précisément un four à induction, comprenant un creuset à paroi latérale refroidie par une circulation de fluide et une sole placée sous la paroi latérale, un premier circuit électrique de chauffage par induction comprenant un premier inducteur et un générateur de puissance électrique, et un deuxième circuit électrique de chauffage par induction, comprenant un deuxième inducteur, l'un des inducteurs étant placé autour de la paroi latérale, et l'autre sous ou dans la sole, caractérisé en ce que le deuxième circuit est dépourvu de générateur de puissance électrique mais en couplage électromagnétique avec le premier circuit et pourvu d'un dispositif de condensateurs électriques à capacité réglable, ledit dispositif de condensateurs électriques étant relié au deuxième inducteur.
- [0018] Ce dispositif électrique à double circuit exploite un phénomène de résonance électrique du four, facilité par l'interaction électromagnétique libre des deux circuits. Contrairement aux dispositifs connus dans lesquels un inducteur entourant la paroi latérale et un inducteur affecté à la sole sont excités par une même source de puissance en étant reliés l'un à l'autre, ou par deux sources différentes en étant alors séparés l'un de l'autre, on n'observe aucun antagonisme des champs magnétiques d'induction à leur jonction et aucune perturbation sur les circuits électriques. Il en résulte un meilleur rendement électrique et des pertes réduites.
- [0019] Un autre avantage de l'invention est une facilité de mieux répartir le chauffage, qu'il est en particulier possible de rendre plus important à cœur et au fond, juste au-dessus de la sole, pour améliorer le procédé et faciliter éventuellement la coulée. Cette répartition du chauffage dépend du réglage de la capacité totale (ajustable au cours de la fusion), avec d'ailleurs une très grande sensibilité aux variations de cette capacité, au point qu'il est possible soit d'obtenir une bonne uniformité des températures, soit au contraire de chauffer essentiellement soit à la périphérie, soit au cœur, soit au fond de la charge fondue.
- [0020] Il sera courant que le premier inducteur soit disposé autour de la paroi latérale puisqu'il constitue l'inducteur principal, le second circuit électrique étant alors affecté à la sole. La disposition inverse peut toutefois être rencontrée sans qu'elle soit critiquable, notamment pour les creusets à grande surface et faible hauteur.
- [0021] L'inducteur de fond du creuset peut former une spirale couverte d'un isolant électrique et très bon conducteur thermique : il est alors possible et avantageux que la sole de fond du creuset soit constituée par ledit inducteur lui-même, ce qui simplifie la conception du creuset et améliore le rendement du chauffage.
- [0022] Le four à induction peut comprendre au moins un circuit supplémentaire dépourvu de générateur de puissance électrique et comprenant un inducteur et un dispositif de condensateurs ayant une capacité totale réglable, et en couplage électromagnétique avec au moins le premier circuit ; ce circuit supplémentaire ou ces circuits supplé-

mentaires ont donc les mêmes propriétés que le deuxième circuit mentionné. Ils peuvent se révéler utiles en partie haute du four pour améliorer le chauffage des quantités nouvellement introduites de la charge. On peut alors les placer au-dessus du sommet du creuset, face à l'inducteur situé sur ou dans la sole, et parallèlement à lui.

[0023] Le circuit supplémentaire ou les circuits supplémentaires peuvent alors être avantageusement équipés d'un sectionneur permettant de les ouvrir à volonté.

[0024] L'invention sera maintenant décrite dans différents aspects, caractéristiques et avantages au moyen des figures suivantes qui en représentent certaines réalisations particulières, purement illustratives :

[0025] [fig.1] une vue générale du four à induction ;

[0026] [fig.2] une vue de l'inducteur latéral ;

[0027] [fig.3] une vue de l'inducteur de fond ;

[0028] [fig.4] un schéma du circuit électrique ;

[0029] [fig.5] une réalisation de la batterie de condensateurs ;

[0030] [fig.6] une autre réalisation ;

[0031] [fig.7] un premier état de chauffage ;

[0032] [fig.8] le même, en vue de dessous ;

[0033] [fig.9] un deuxième état de chauffage ;

[0034] [fig.10] le même, en vue de dessous ;

[0035] [fig.11] un troisième état de chauffage ;

[0036] [fig.12] le même, en vue de dessous ;

[0037] [fig.13] un autre mode de réalisation du creuset ;

[0038] [fig.14] un troisième mode de réalisation du creuset ;

[0039] [fig.15] la sole de ce troisième mode ;

[0040] [fig.16] une coupe de la sole du premier mode.

[0041] Un mode de réalisation va être décrit au moyen des figures 1 à 3. Cette réalisation de four à induction comprend une paroi latérale 1 ou virole cylindrique composée de tubes 2 de cuivre ou inox verticaux adjacents et reliés par des intercalaires isolant de l'électricité pour empêcher l'apparition de courants induits circulaires dans la paroi latérale 1. Les tubes 2 sont parcourus par un liquide de refroidissement tel que l'eau, suivant des dispositions connues. Un circuit de refroidissement 12 peut faire circuler le liquide alternativement vers le haut et vers le bas avec des raccords entre tubes 2 alternativement à l'extrémité supérieure et l'extrémité inférieure. Une autre construction possible, parmi d'autres encore, serait celle de US – 6 996 153 – B2, où chaque tube est refroidi indépendamment par un circuit faisant un aller et retour vertical.

[0042] Un inducteur latéral 3 entoure la paroi latérale 1. Il est ici à spire unique et composé de brins 4 parallèles et superposés en hauteur et faisant chacun un tour unique du creuset. Leurs extrémités sont réunies par deux raccords verticaux 5 et 6, qui

assurent d'ailleurs aussi bien le raccordement électrique à un générateur de puissance électrique alternative que le raccordement hydraulique, les brins 4 étant eux aussi refroidis par la circulation du liquide de refroidissement, connectés au circuit de refroidissement 13. D'autres agencements de l'inducteur latéral, notamment à spires successives en hélice, seraient encore possibles.

- [0043] Le creuset est complété par une sole 8 composé principalement d'un inducteur auxiliaire 7 en forme de spirale (figures 3 et 16). L'inducteur auxiliaire 7 est lui aussi un tube refroidi par de l'eau, et ses extrémités 9 et 10 mènent aussi à un circuit de refroidissement 14. Les spires 31 de la spirale sont jointes par un isolant de l'électricité 32 intercalaire isolant électrique et très bon conducteur de la chaleur qui les sépare tout en donnant une structure continue à la sole 8. De plus, l'inducteur auxiliaire 7 est recouvert à sa face supérieure par une couche mince isolante 33 de l'électricité et bonne conductrice de la chaleur, composée d'alumine par exemple. Une telle conception permet de supprimer la sole classiquement utilisée et de retenir la charge du creuset directement par l'inducteur auxiliaire 7.
- [0044] Le refroidissement de la sole 8 et de la paire latérale 1 amène aussi la formation de l'auto-creuset, c'est-à-dire qu'une couche de la charge à leur contact reste solide et les protège de la corrosion.
- [0045] Un bouchon de coulée 11 est disposé au centre de la spirale. Il est refroidi par un dispositif classique, non représenté ici. Les circuits de refroidissement 12, 13 et 14 de la paroi latérale 1, de l'inducteur principal 3 et de l'inducteur auxiliaire 7 sont seulement schématisés ici, étant conformes aux réalisations déjà connues et pouvant comprendre chacun notamment une pompe et un échangeur de chaleur.
- [0046] Le dispositif électrique est décrit à la figure 4. L'inducteur principal 3 est relié aux bornes d'un générateur de puissance 15 électrique de courant alternatif. Une batterie de condensateurs 16 est également reliée aux bornes du générateur de puissance 15, en parallèle à l'inducteur principal 3. L'ensemble forme un circuit électrique principal 18 fermé. Ce circuit électrique principal 18 possède une résistance due surtout aux résistances de la structure du creuset, de la charge contenue dans celui-ci et de l'inducteur principal 3. L'inducteur auxiliaire 7 forme avec une batterie réglable de condensateurs 17 un circuit électrique auxiliaire 19 fermé, qui est matériellement séparé du générateur de puissance 15 et dépourvu de générateur de puissance propre. Ce circuit électrique auxiliaire 19 possède une résistance due surtout à l'inducteur auxiliaire 7. La proximité des inducteurs 3 et 7 fait qu'un couplage électromagnétique apparaît entre les circuits électriques 18 et 19 en fonctionnement, malgré l'absence d'un générateur de puissance dans le circuit électrique auxiliaire 19. Ce couplage varie notamment en fonction de la puissance injectée et de la charge dans le creuset, et aussi d'un réglage de la capacité totale de la batterie de condensateurs 17, qui est composée

de condensateurs individuels, qui peuvent être branchés au circuit électrique auxiliaire 19 ou en être séparés par des interrupteurs 21. Les condensateurs individuels 20 peuvent être placés en parallèle comme il est représenté à la figure 5, ou autrement. En variante (figure 6), la batterie de condensateurs 17 pourrait être remplacée par un condensateur réglable 22 dont l'effet serait identique.

[0047] L'invention est fondée sur le couplage électromagnétique entre les circuits électriques 18 et 19 par les inducteurs 3 et 7, pour ajuster les courants induits par ceux-ci et agir sur la répartition du chauffage dans la charge contenue dans le creuset, afin notamment d'homogénéiser sa température pendant un processus de fusion et de brassage, ou (entre autres possibilités) d'augmenter le chauffage au fond afin de dégager le bouchon de coulée 11 et faciliter une coulée.

[0048] Les effets obtenus peuvent être ceux du tableau 1 donné ci-dessous :

[0049]

[Tableaux1]

Four	Tension inducteur principal 3 alimenté par le générateur 15 [V]	Courant inducteur principal 3 [A]	Tension aux bornes de l'inducteur auxiliaire 7 [V]	Courant inducteur auxiliaire 7 [A]	Puissance active four [kW]	Rendement four [%]	Pertes dans la paroi latérale 1 [kW]	Pertes dans l'inducteur auxiliaire 7 [kW]	Pertes dans l'inducteur principal 3 [kW]
1 - SOLE SPIRALE non raccordé	1254	2008	1191	-	267.8	74.	64.7	1.4	2.5
2 - SOLE, 60 [nF]	1049	1444	2474	265.8	246.5	81.	39.5	3.7	1.3
3 - SOLE, 69,45 [nF]	958.0	1216	2941	365.8	241.6	85.	32.6	5.3	1
4 - SOLE, 75 [nF]	887	1045	3309	444.4	241.8	84.	28.9	6.9	0.8
5 - SOLE, 90 [nF]	527.	507.	4518	728.1	234.1	82.	24.9	14.2	0.7

[0050] La première ligne représente le fonctionnement d'un dispositif où le circuit auxiliaire 19 serait ouvert. Les tensions aux bornes de l'inducteur principal 3 et le courant qui y circule sont importants, la tension aux bornes de l'inducteur auxiliaire 7 est faible, le chauffage s'effectue donc essentiellement par l'inducteur principal 3, mais avec des pertes importantes dans la paroi latérale 1 et un rendement relativement faible. Ce mode de fonctionnement est analogue aux conditions connues et n'est ni représentatif

de l'invention, ni recherché normalement. Les figures 7 et 8, qui représentent la répartition des températures dans la charge fondue en perspective de dessus et en perspective de dessous (les nuances claires de couleur signifiant un chauffage local plus important) illustrent un chauffage important à la périphérie, ici plus faible au centre, la charge étant donc là beaucoup plus froide, et surtout un chauffage par le générateur de puissance 15 très faible juste au-dessus de la sole. Le choix d'une fréquence d'excitation différente peut faire varier la répartition du chauffage dans la direction radiale, mais le chauffage restera de toute façon faible au fond du creuset, et l'homogénéité des températures ne sera pas atteinte.

[0051] Les lignes suivantes du tableau illustrent l'effet de capacités croissantes de la batterie de condensateurs 17 ou du condensateur réglable 22. La résonance électromagnétique se renforce, la tension aux bornes de l'inducteur principal 3 et l'intensité du courant décroissent, alors que la tension aux bornes de l'inducteur auxiliaire 7 et l'intensité du courant qui y passe croissent. Les pertes dans la paroi latérale 1 diminuent fortement et de plus en plus, et les pertes dans l'inducteur auxiliaire 7 croissent tout en restant à des valeurs bien inférieures, ce qui fait que le rendement du four est beaucoup plus important et atteint un maximum de 85% à une valeur de capacité estimée ici à 69,45 nF. Les diamètres typiques de répartition de l'échauffement dans la charge sont alors ceux des figures 9 et 10, encore en perspective de dessus et de dessous respectivement : une homogénéité excellente du chauffage est obtenue dans la charge, et on observe cette fois que le fond du creuset est chauffé, en étant presque à la même température que les portions situées au-dessus.

[0052] En augmentant encore la capacité de la batterie de condensateurs 17 ou du condensateur réglable 22, le chauffage du fond du creuset peut être accentué au détriment du reste : les figures 11 et 12 illustrent l'état obtenu à la capacité de 90 nF, qui correspond expérimentalement dans ce cas à une résonance électrique maximale, où la tension aux bornes de l'inducteur principal 3 et l'intensité du courant sont minimales, alors que la tension aux bornes de l'inducteur auxiliaire 7 et le courant qui y circule sont maximales. Le sommet de la charge est très peu chauffé, et le chauffage se concentre au fond du creuset comme le montre la figure 12. Le maintien de cet état de capacité totale importante de la batterie 17 et de résonance maximale, où le circuit électrique auxiliaire 19 travaille le plus en fournissant une puissance maximale, permet de concentrer le chauffage près du circuit électrique auxiliaire 19, c'est-à-dire ici au fond du creuset, et de favoriser la fusion de la croûte solide tandis que le brassage du bain fondu se poursuit. La coulée par gravité peut alors être obtenue en ouvrant le bouchon 11.

[0053] La figure 13 illustre l'utilisation d'un deuxième circuit électrique auxiliaire 23, comprenant un inducteur 24 et un condensateur 25 placé aux bornes de l'inducteur 24

en fermant le circuit. Le condensateur 25 peut être réglable ou non. L'inducteur 24 est placé au-dessus du sommet du creuset, de forme analogue à celle du circuit électrique auxiliaire 19 et lui faisant face. Le deuxième circuit électrique auxiliaire 23 est dépourvu de générateur électrique. Il travaille aussi en couplage électromagnétique résonant avec le circuit principal 18 et permet, avec un réglage ou un choix judicieux de la capacité du condensateur 25, d'instaurer un chauffage supplémentaire du creuset à sa partie supérieure, ce qui peut être utile soit pour un préchauffage d'une portion de charge nouvellement introduite dans le creuset, notamment dans des procédés à introduction progressive de la charge, ou encore pour des procédés où le volume de la charge est plus important et s'élève jusqu'à sa hauteur. Le deuxième circuit auxiliaire 26 peut être désactivé en ouvrant un sectionneur 26.

- [0054] L'invention peut être mise en œuvre de bien d'autres façons. Les figures 14 et 15 illustrent un mode de réalisation où la sole, portant alors la référence 27, est composée de boîtes à eau 28 en secteurs de cercles joints par des tubes incurvés 29 de circulation de liquide de refroidissement d'une boîte à eau 28 à la suivante. Les extrémités 30 du circuit de refroidissement servent aussi de branchement à une batterie de condensateurs réglable comme dans la réalisation précédente. Le dispositif est par ailleurs identique au précédent, et le fonctionnement est analogue ; mais ce mode de réalisation n'est pas préféré puisque le couplage électromagnétique au profit du circuit auxiliaire serait beaucoup moins bon.
- [0055] Il serait encore possible de placer l'inducteur auxiliaire au-dessous d'une sole réfractaire et inerte électriquement, comme dans des dispositifs connus, au prix encore d'une diminution du rendement.
- [0056] Les inducteurs peuvent être de tout genre connu. L'inducteur auxiliaire envisagé principalement est en forme de spirale, mais un inducteur à spire unique, formé de plusieurs brins concentriques disposés en parallèle ou d'un seul brin, serait envisageable et devrait donner de bons résultats. L'inducteur principal envisagé ici, à plusieurs brins parallèles et à spire unique, pourrait réciproquement être remplacé par un inducteur en hélice à plusieurs spires.
- [0057] Les capacités totales auxquelles il est possible de régler la batterie de condensateurs 17 devront être choisies pour permettre différents modes de fonctionnement correspondant aux répartitions de chauffage qu'on souhaite obtenir, comme une bonne homogénéité dans la plus grande partie du volume, et un chauffage suffisamment concentré au fond du creuset pour permettre la coulée. Il sera généralement indiqué que l'état de résonance maximale du circuit puisse être atteint afin de pouvoir envoyer le maximum de puissance dans le circuit auxiliaire 19. L'état correspondant au rendement le plus élevé pourra être préféré pendant la plus grande partie du procédé, sans que cela soit indispensable puisque le rendement reste amélioré dans une gamme

de valeurs importantes de la capacité totale de la batterie de condensateurs 17.

- [0058] Les positions de l'inducteur principal (relié au générateur de puissance électrique) et de l'inducteur auxiliaire (équipé du condensateur réglable) pourraient être interverties, sans changement de la structure du creuset et de l'agencement des circuits électriques que représentent les figures 1 à 4 notamment.
- [0059] D'autres circuits auxiliaires, en couplage électromagnétique avec le circuit principal, composés d'un inducteur et d'un condensateur et dépourvus de générateur électrique propre, pourraient être ajoutés encore en cas de besoin à divers endroits du creuset.

Revendications

- [Revendication 1] Four à induction, comprenant un creuset (1, 8) à paroi latérale (1) refroidie par une circulation de fluide et une sole (8) placée sous la paroi latérale (1), un premier circuit électrique (18) de chauffage par induction comprenant un premier inducteur (3) et un générateur de puissance (15) électrique, et un deuxième circuit électrique (19) de chauffage par induction, comprenant un deuxième inducteur (7), l'un des inducteurs étant placé autour de la paroi latérale, et l'autre sous ou dans la sole, caractérisé en ce que le deuxième circuit (19) est dépourvu de générateur de puissance électrique mais en couplage électromagnétique avec le premier circuit (18) et pourvu d'un dispositif (17) de condensateurs électriques à capacité réglable, ledit dispositif de condensateurs électriques étant relié au deuxième inducteur (7).
- [Revendication 2] Four à induction selon la revendication 1, caractérisé en ce que la sole (8) est constituée par un desdits inducteurs (7), qui est en forme de spirale composée de spires (31) jointes par un isolant électrique (32).
- [Revendication 3] Four à induction selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que le dispositif de condensateurs électriques comprend un condensateur à capacité variable (22).
- [Revendication 4] Four à induction selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que le dispositif de condensateur électrique comprend des condensateurs (20) reliés au deuxième circuit (19) par des sectionneurs (21).
- [Revendication 5] Four à induction selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le premier inducteur (3) est placé autour de la paroi latérale (2).
- [Revendication 6] Four à induction selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le premier inducteur est placé sous ou dans la sole.
- [Revendication 7] Four à induction selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un circuit électrique supplémentaire (23) de chauffage par induction, dépourvu de générateur de puissance électrique et comprenant un inducteur (24) et un dispositif de condensateurs ayant une capacité totale réglable, et en couplage électromagnétique avec au moins le premier circuit (18).
- [Revendication 8] Four à induction selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'au moins un dit circuit électrique supplémentaire est équipé d'un sectionneur (26) permettant de l'ouvrir.

- [Revendication 9] Four à induction selon l'une quelconque des revendications 7 ou 8, caractérisé en ce que l'inducteur de l'au moins un circuit supplémentaire est placé au-dessus du creuset et face au deuxième circuit électrique.
- [Revendication 10] Four à induction selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que la capacité totale du dispositif de condensateurs du deuxième circuit est réglable à un état de résonance électrique maximale du four.

[Fig. 1]

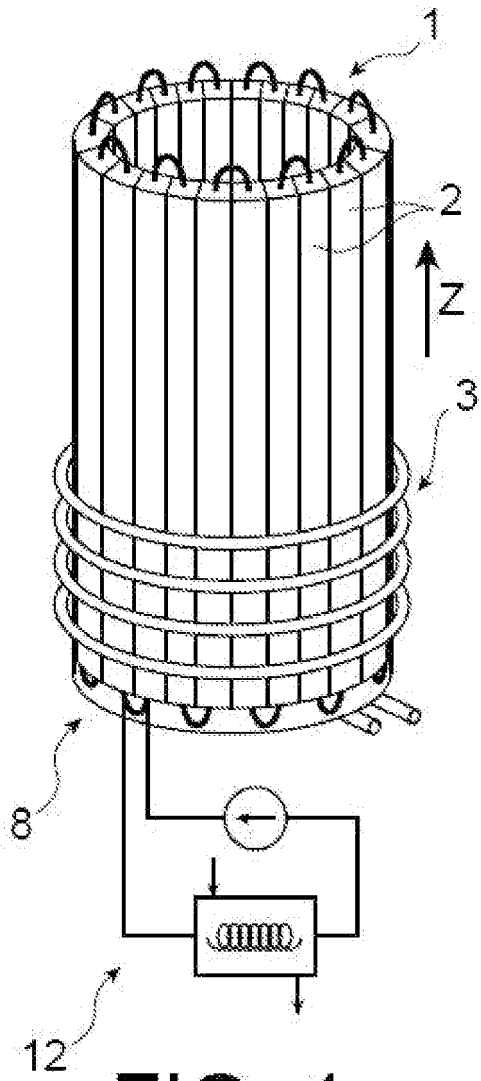
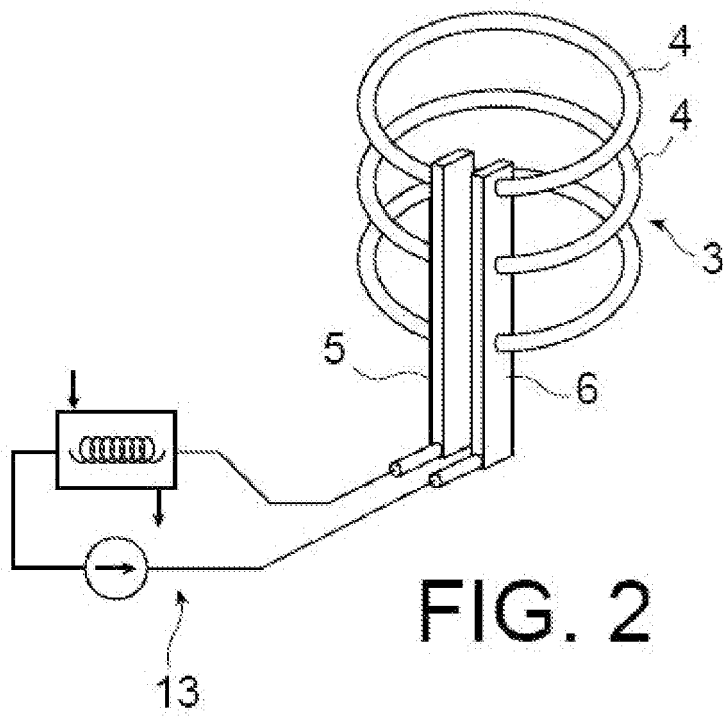
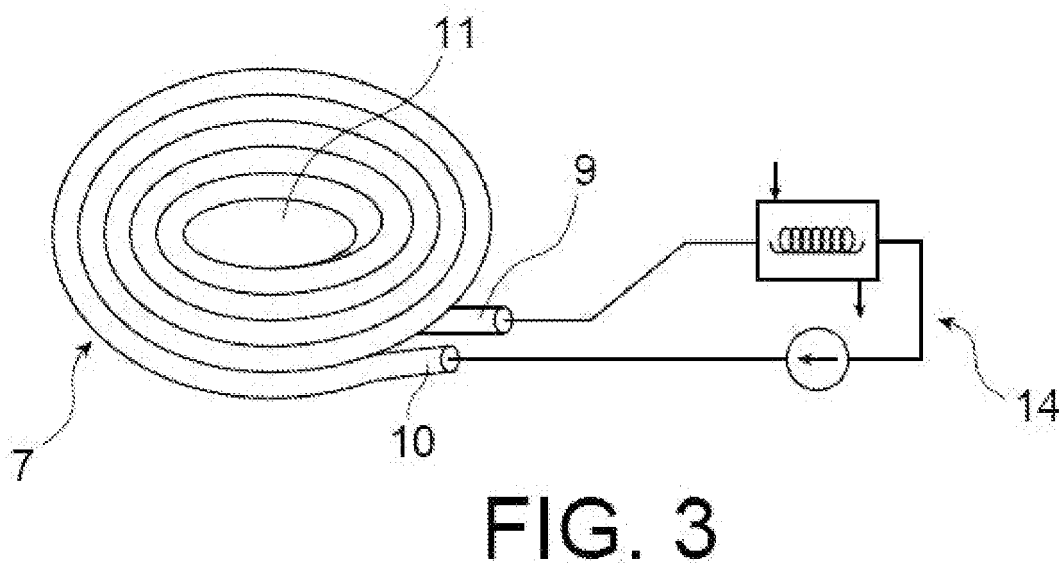


FIG. 1

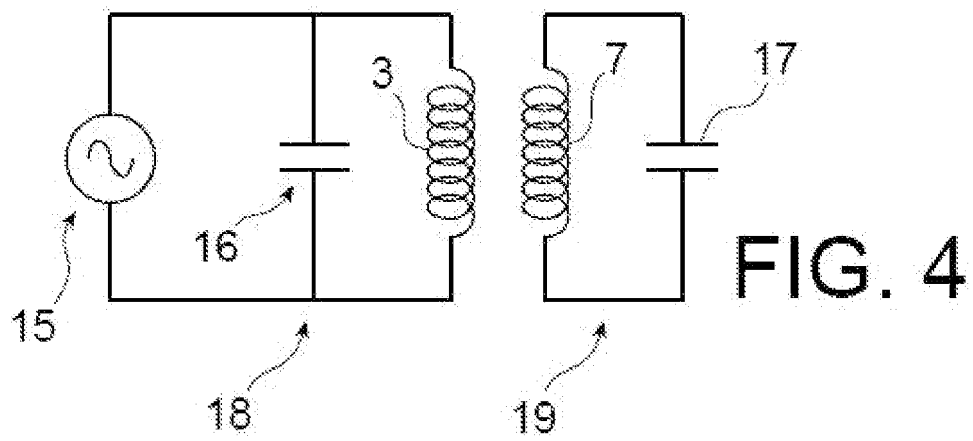
[Fig. 2]



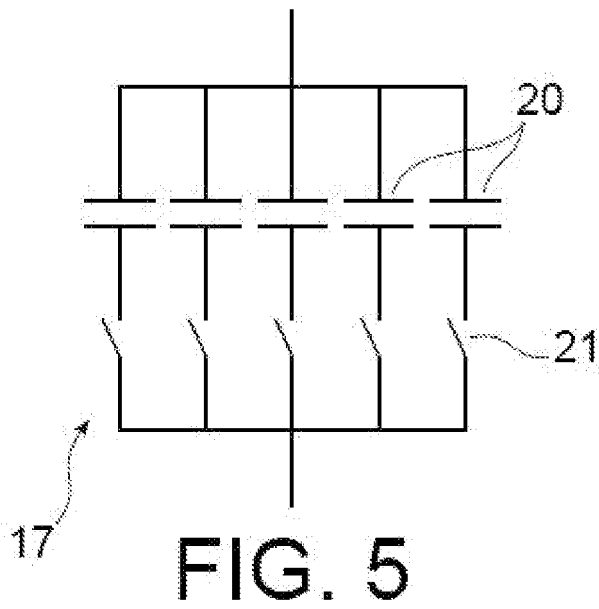
[Fig. 3]



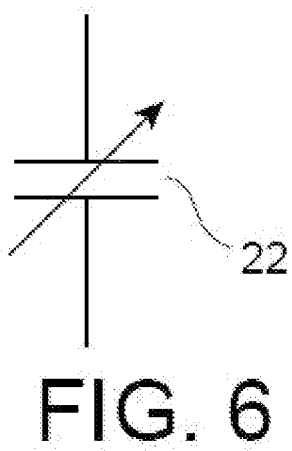
[Fig. 4]



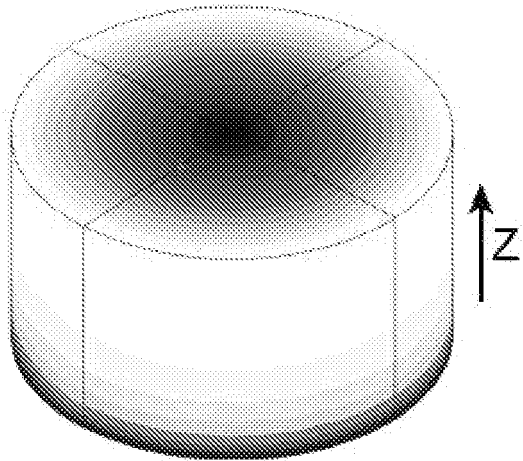
[Fig. 5]



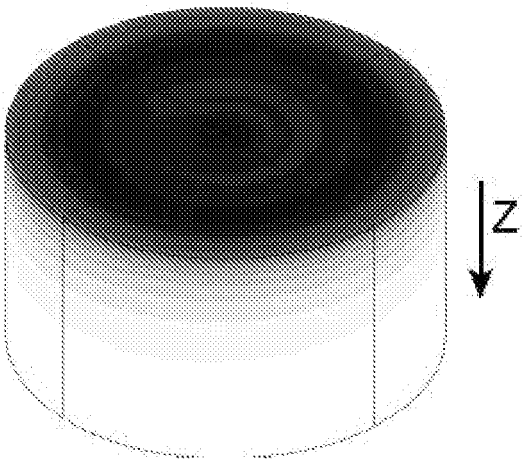
[Fig. 6]



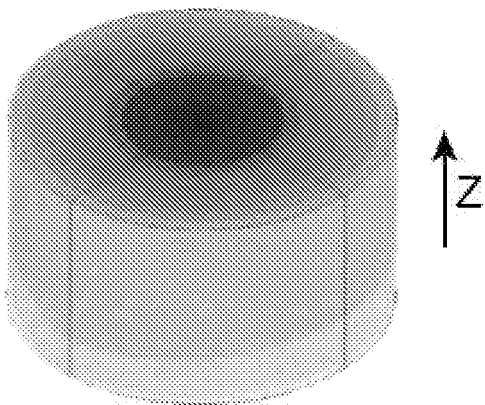
[Fig. 7]

**FIG. 7**

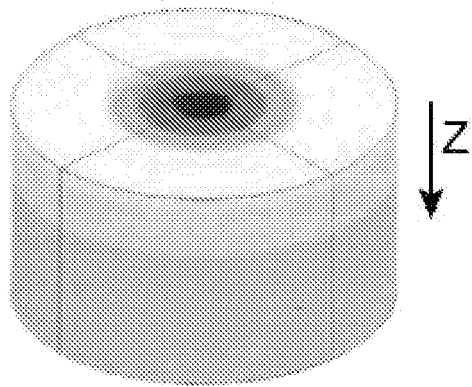
[Fig. 8]

**FIG. 8**

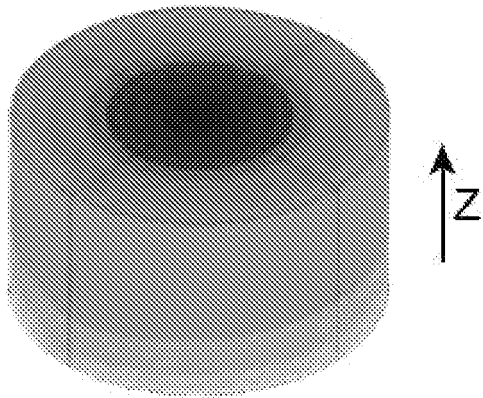
[Fig. 9]

**FIG. 9**

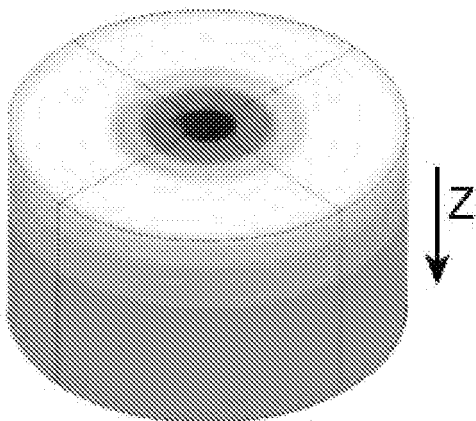
[Fig. 10]

**FIG. 10**

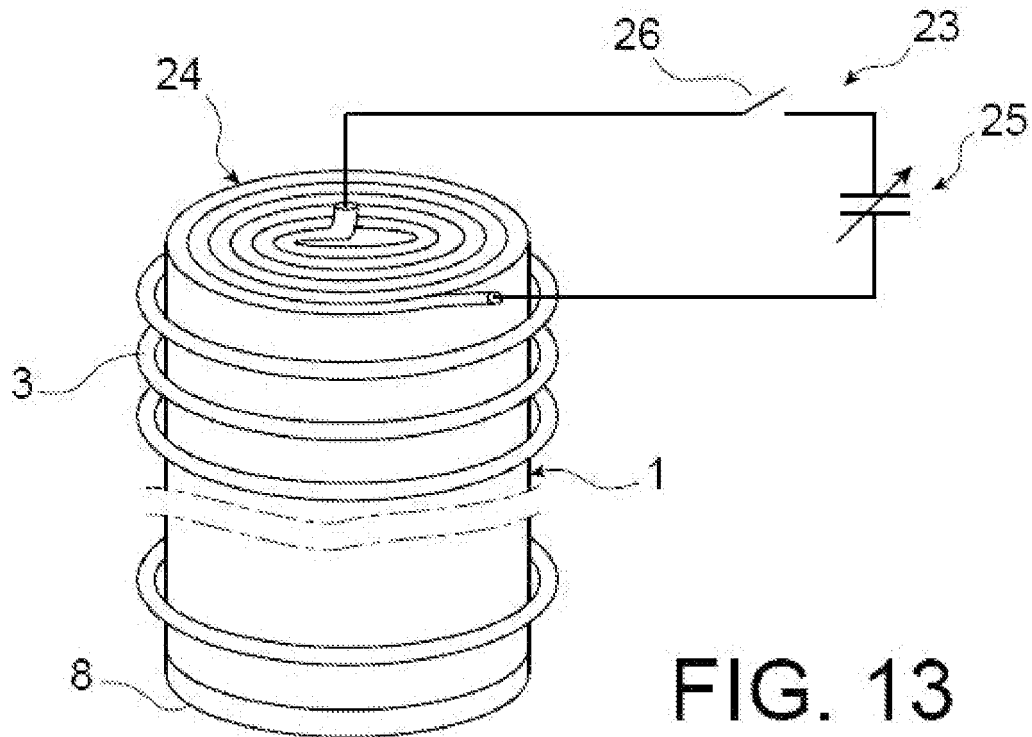
[Fig. 11]

**FIG. 11**

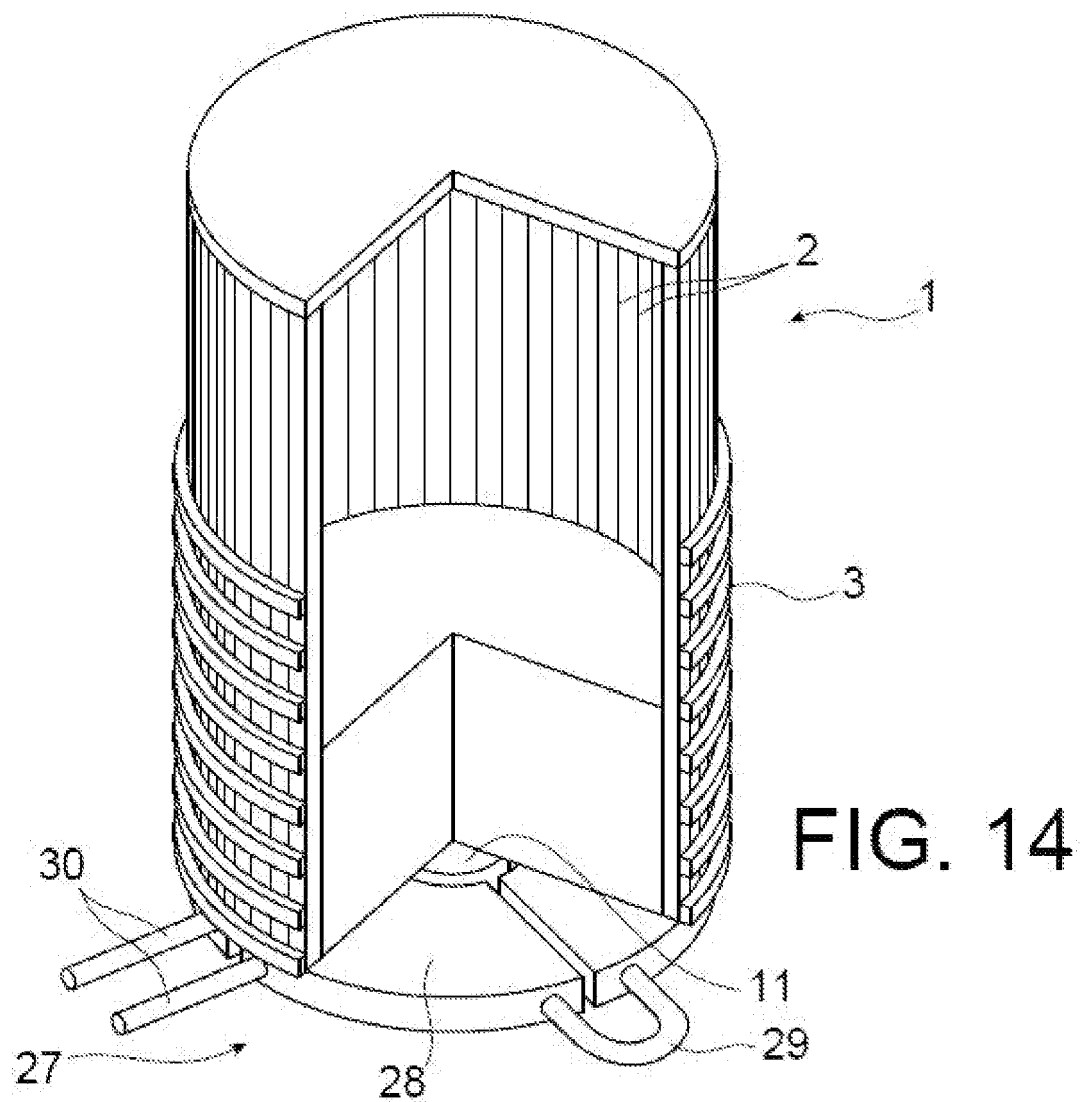
[Fig. 12]

**FIG. 12**

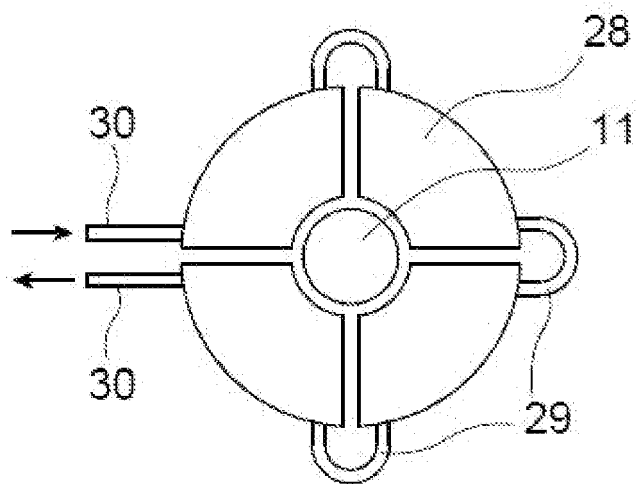
[Fig. 13]



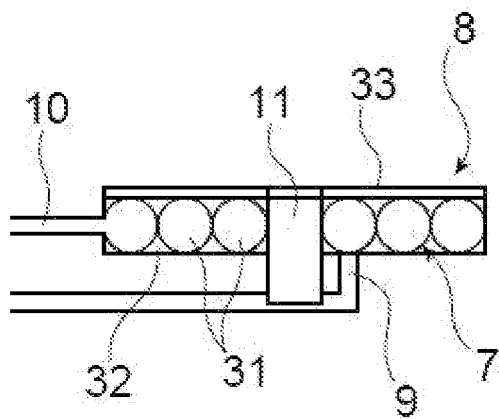
[Fig. 14]



[Fig. 15]

**FIG. 15**

[Fig. 16]

**FIG. 16**

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☐ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

US 2018/160486 A1 (CHIANG CHEN-HSUEH [TW])
7 juin 2018 (2018-06-07)

FR 2 857 522 A1 (CENTRE NAT RECH SCIENT
[FR]; UNIV SHERBROOKE [CA])
14 janvier 2005 (2005-01-14)

WO 2011/073592 A1 (EFD INDUCTION SA [FR];
LECOMTE GUILLAUME [FR])
23 juin 2011 (2011-06-23)

WO 2014/125107 A1 (COMMISSARIAT L ÉNERGIE
ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES [FR]
ET A) 21 août 2014 (2014-08-21)

DE 700 264 C (STALTURBINE GMBH)
17 décembre 1940 (1940-12-17)

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT