



(11)

EP 3 379 172 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
26.09.2018 Bulletin 2018/39

(51) Int Cl.:
F25B 9/14 (2006.01) **F25B 25/00** (2006.01)
F25D 17/02 (2006.01) **F04D 7/02** (2006.01)
F04D 13/02 (2006.01) **F04B 15/08** (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **18163528.5**

(22) Date de dépôt: **23.03.2018**

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA ME
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

(72) Inventeurs:
• **VIARGUES, François**
38600 FONTAINE (FR)
• **MARZO, Gérard**
38000 GRENOBLE (FR)
• **ROLLET, Bertrand**
73000 CHAMBERY (FR)

(30) Priorité: **24.03.2017 FR 1752490**

(74) Mandataire: **Novaimo**
ActiTech 8
60 avenue Marie Curie
Archamps Technopole
74166 Saint Julien-en-Genevois Cedex (FR)

(71) Demandeur: **Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives**
75015 Paris (FR)

(54) **INSTALLATION CRYOGÉNIQUE COMPRENANT UN CIRCULATEUR**

(57) L'invention concerne un circulateur (2) assurant une circulation d'un fluide frigorigique (4) dans un circuit (6) d'une installation cryogénique (1) depuis et vers un élément (3) présentant une charge thermique, le circulateur (2) comportant un module d'entraînement (8a, 8b)

et un module de pompage (9a, 9b) pourvu d'une roue centrifuge (10), ledit module d'entraînement (8a, 8b) étant accouplé magnétiquement (51) audit module de pompage (9a, 9b) afin d'animer ladite roue centrifuge (10) d'un mouvement rotatif.

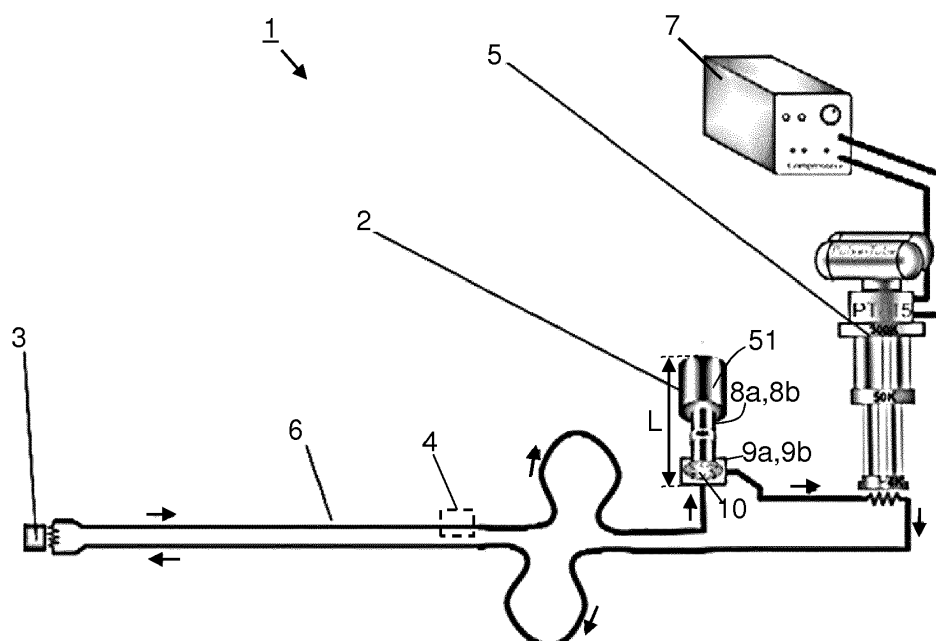


FIGURE 1

Description

[0001] La présente invention concerne un circulateur assurant la circulation d'un fluide frigorigène dans un circuit d'une installation cryogénique de type boucle cryogénique ainsi qu'une telle installation cryogénique comprenant ce circulateur.

[0002] On connaît dans l'état de la technique, des installations cryogéniques pour un refroidissement d'un élément présentant une charge thermique comprenant une machine cryogénique du type « *tube à gaz puisé* » connue en anglais sous l'expression « *pulse tube* » et un circuit reliant la machine cryogénique et ledit élément, et dans lequel circule un fluide frigorigène tel que de l'hélium ou encore de l'azote.

[0003] Dans ces installations, un tel fluide frigorigène est mis en mouvement par un circulateur dont le contrôle du fonctionnement est notamment assuré à partir de mesures de débit du fluide requérant l'utilisation d'un débitmètre thermique disposé dans le circuit de ces installations. Un tel circulateur comprend un compartiment principal dans lequel est agencé un moteur électrique pourvu d'un arbre moteur supporté par un dispositif palier de ce moteur comprenant des roulements, ledit arbre moteur comportant une extrémité sur laquelle est montée une roue centrifuge. Dans ce circulateur, des câbles électriques prévus pour alimenter le moteur, sont reliés à ce dernier à travers un passage étanche isolant ainsi un tel passage du compartiment principal dans lequel le moteur, le dispositif palier et la roue centrifuge baignent dans le fluide frigorigène.

[0004] Toutefois un des inconvénients de ces installations cryogéniques est lié au fait qu'elles ne sont pas adaptées à des applications pour lesquelles le fluide frigorigène doit être maintenu à des températures cryogéniques dites « basses » qui sont inférieures à 10K. En effet, à de telles températures, le circulateur présente de nombreux dysfonctionnements et engendre également d'importantes pertes thermiques dans ces installations cryogéniques.

[0005] Effectivement, le moteur électrique d'un tel circulateur est configuré pour fonctionner à une température d'utilisation qui correspond à la température ambiante. Dès lors, que cette température d'utilisation s'approche de températures cryogéniques basses, le moteur est alors sujet à des anomalies de fonctionnement qui peuvent se traduire par exemple par un blocage du mouvement de rotation de l'arbre moteur et donc de la roue centrifuge résultant d'une solidification intervenant à de telles températures d'un lubrifiant utilisé dans les roulements du dispositif palier de ce moteur, et des jeux trop faibles (contractions thermiques).

[0006] De plus, lorsque le circulateur fonctionne à de telles températures cryogéniques basses, des phénomènes de convection naturelle interne provenant de la circulation du fluide dans le compartiment principal de ce circulateur, engendrent de très importants échanges thermiques entre la zone du compartiment où se trouve

le moteur à une température en moyenne supérieure de 250K à la température régnant dans la zone de ce compartiment où est située la roue centrifuge. Ces échanges thermiques ont pour conséquence d'engendrer des pertes thermiques considérables dans ces installations cryogéniques qui rendent alors l'utilisation d'un tel circulateur incompatible avec le fonctionnement de ces installations à de telles températures.

[0007] Un des buts de l'invention est donc de remédier aux inconvénients cités précédemment et d'améliorer les installations cryogéniques connues de l'état de la technique. En particulier, l'invention propose une installation cryogénique définie pour fonctionner de manière optimale dans une large gamme de températures cryogéniques notamment à des températures cryogéniques basses inférieure ou égale à 30K voire moins et par exemple de l'ordre de 5K.

[0008] Dans ce dessein, l'invention porte sur un circulateur assurant une circulation d'un fluide frigorigène dans un circuit d'une installation cryogénique depuis et vers un élément présentant une charge thermique, le circulateur comportant un module d'entraînement et un module de pompage pourvu d'une roue centrifuge, ledit module d'entraînement étant accouplé magnétiquement audit module de pompage afin d'animer ladite roue centrifuge d'un mouvement rotatif.

[0009] Dans d'autres modes de réalisation :

- le module de pompage comprend un arbre d'entraînement comportant un rotor magnétique ainsi que ladite roue centrifuge en une première extrémité ;
- le module de pompage comprend un dispositif palier supportant un arbre d'entraînement de la roue centrifuge comprenant des premier et deuxième roulements notamment des roulements cryogéniques ;
- le module de pompage comprend une enveloppe définissant une enceinte étanche dans laquelle est compris un arbre d'entraînement de la roue centrifuge ;
- l'enveloppe comprend un carter du rotor magnétique et une volute ;
- le module d'entraînement est un moteur électrique comprenant un arbre moteur pourvu d'une extrémité libre comprenant un élément de support d'au moins deux éléments magnétiques de polarités opposées notamment d'au moins deux aimants permanents ;
- l'élément de support est défini pour entourer une circonférence de tout ou partie d'un carter d'un rotor magnétique d'une enveloppe du module de pompage de manière à coopérer avec ledit rotor magnétique ;
- un rotor magnétique est agencé entre des premier et deuxième roulements d'un dispositif palier en étant monté sur un arbre d'entraînement de la roue centrifuge ;
- le module d'entraînement comprend un stator magnétique notamment comportant au moins deux électroaimants agencés autour d'une circonférence

de tout ou partie d'un carter d'un rotor magnétique d'une enveloppe du module de pompage de manière à coopérer avec ledit rotor magnétique ;

- le stator magnétique et le rotor magnétique monté sur l'arbre d'entraînement forment ensemble un moteur électrique présentant des caractéristiques de fonctionnement sensiblement similaires à celles d'un moteur tournant, et
- le circulateur est un mini-circulateur.

[0010] L'invention porte également sur une installation cryogénique pour un refroidissement d'un élément présentant une charge thermique comprenant un tel circulateur assurant une circulation d'un fluide frigorigène dans un circuit de cette installation cryogénique depuis et vers ledit élément.

[0011] Avantageusement, l'installation cryogénique comprend au moins une machine cryogénique de type tube à gaz pulsé et une unité de compression et de contrôle.

[0012] Avantageusement aussi, l'installation cryogénique comprend un cryostat pourvu d'une enceinte entretenue sous un vide d'isolement.

[0013] De manière particulière, le cryostat comprend le circulateur, la machine cryogénique et le circuit.

[0014] Un circulateur selon un aspect de l'invention est défini par la revendication 1.

[0015] Des modes de réalisation de ce circulateur sont définis par les revendications 2 à 7.

[0016] Une installation cryogénique selon un aspect de l'invention est définie par la revendication 8.

[0017] Des modes de réalisation de cette installation sont définis par les revendications 9 à 12.

[0018] D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront mieux à la lecture de la description d'un mode de réalisation préféré qui va suivre, en référence aux figures, réalisé à titre d'exemple indicatif et non limitatif :

- la figure 1 représente une installation cryogénique de type boucle cryogénique pour le refroidissement d'un élément recevant une charge thermique, selon le mode de réalisation de l'invention, et
- les figures 2A et 2B représentent des vues schématiques de modules d'entraînement et de pompage des première et deuxième variantes du circulateur, selon le mode de réalisation de l'invention.

[0019] Dans la description qui va suivre, des chiffres de référence identiques désignent des pièces identiques ou ayant des fonctions similaires.

[0020] Un mode de réalisation de l'installation cryogénique 1 de type boucle cryogénique, pour un refroidissement d'un élément 3 présentant une charge thermique selon l'invention est décrit ci-après en référence à la figure 1. Une telle installation cryogénique 1 est configurée pour fonctionner à toutes les températures cryogéniques

par exemple inférieures à 30K ou 25K notamment à des températures cryogéniques dites « basses » qui sont inférieures à 5K ou 10K. Dans cette installation cryogénique 1, l'élément 3 autrement appelé « *utilisateur* », peut être un dispositif ou un objet à refroidir qui génère ou reçoit cette charge thermique.

[0021] L'installation cryogénique 1 comprend principalement l'élément 3 présentant la charge thermique, un circulateur 2, un circuit 6 dans lequel circule un fluide frigorigène 4 et une machine cryogénique 5.

[0022] Cette installation cryogénique 1 comprend également une unité de compression et de contrôle 7 reliée à la machine cryogénique 5. Cette installation cryogénique 1 peut comprendre un cryostat (non représenté) dans lequel sont situées les composantes suivantes de cette installation 1 : le circulateur 2, la machine cryogénique 5 et une partie du circuit 6. On notera que ces composantes sont bien entendu connectées à ce circuit 6. Un tel cryostat comprend une enceinte entretenue sous un vide dynamique encore appelé « *vide d'isolement* » pour minimiser les pertes thermiques par convection et conduction gazeuses. On notera que ce vide d'isolement du cryostat entoure la totalité du circulateur 2 contribuant ainsi à ce que le circulateur 2 est maintenu à une température sensiblement constante correspondant à une température cryogénique basse par exemple de 5K voire moins. On notera que la qualité du vide d'isolement requis correspond au domaine appelé couramment "vide secondaire", avec un niveau de pression résiduelle compris typiquement entre 10^{-7} et 10^{-4} mbar.

[0023] Dans le cryostat, ces composants sont fixés mécaniquement par des pièces telles que des brides de fixation qui sont réalisées en un matériau très faiblement conducteur thermique permettant de limiter les fuites thermiques par conduction thermique.

[0024] Dans l'installation cryogénique 1, le circuit 6 réalise un lien thermique entre la machine cryogénique 5 et l'élément 3 présentant la charge thermique. Un tel circuit 6 contribue ainsi à conduire cette charge thermique vers la machine cryogénique 5 afin de l'évacuer. Plus précisément, lorsque l'élément 3 génère cette charge thermique dans le fluide 4, cette dernière provoque alors une élévation de la température du fluide frigorigène 4 en relation avec sa chaleur spécifique et son débit massique. Cette élévation de température du fluide frigorigène 4 peut toutefois rester modérée en fonction de l'importance du débit massique de ce fluide 4. Par la suite lorsque le fluide frigorigène 4 véhiculant la charge thermique passe au niveau de la machine cryogénique 5, il se refroidit en déposant cette charge thermique et repart pour un nouveau cycle. Dans ce contexte, on notera qu'un tel circuit 6 est une boucle calo-porteuse fermée qui véhicule le fluide frigorigène 4 entre la machine cryogénique 5 et l'élément 3 présentant cette charge thermique.

[0025] Dans ce circuit 6 de l'installation cryogénique 1, le fluide frigorigène 4 peut être un fluide sous-pression

de type gazeux ou liquide qui est maintenu à une température inférieure à 5K. Dans le présent mode de réalisation, ce fluide frigorigène 4 est un liquide tel que de l'hélium supercritique à une pression d'environ 20 bars.

[0026] Dans cette installation cryogénique 1, le circuit 6 de circulation du fluide frigorigène 4 est relié à la machine cryogénique 5. Cette machine cryogénique 5 autrement appelée « *cryoréfrigérateur* », est de préférence du type tube à gaz pulsé connu en anglais sous l'expression « *puise tube* ». Une telle machine est utilisée pour produire des températures cryogéniques inférieures à 120K. Cette machine cryogénique 5 comprend une zone d'échange autrement appelée « *bout froid* » qui est destinée à évacuer la charge thermique véhiculée par le fluide frigorigène 4 provenant de l'élément 3 ayant généré une telle charge. Dans ce mode de réalisation, cette machine cryogénique 5 est apte à délivrer une faible puissance frigorigène qui est comprise entre 1 W et 10 W environ, suivant le niveau de température souhaité. La température délivrée par la machine cryogénique 5 prend un équilibre qui est fonction de la charge thermique à évacuer. Le circulateur 2 s'adapte au couple température/charge thermique de l'utilisateur 3.

[0027] Ainsi que nous l'avons vu précédemment, le fluide frigorigène 4 est mis en circulation dans le circuit 6 par le circulateur 2. Ce circulateur 2 visible sur la figure 1 est de préférence un mini-circulateur 2 autrement appelé « *mini-circulateur froid* » ou encore « *micro-circulateur* ». Ce circulateur 2 est défini pour créer une différence de pression dans le fluide 4 nécessaire à vaincre les pertes de charge de circulation de ce dernier dans le circuit 6. Ce circulateur 2 est un appareil de petite taille de forme générale cylindrique. Il peut présenter une longueur L comprise entre 70 et 100 mm, et de préférence 70 mm ainsi qu'une section sensiblement circulaire de diamètre de l'ordre de 50 à 60 mm, et de préférence 50 mm. Un tel circulateur 2 est particulièrement adapté pour délivrer une puissance hydraulique comprise entre 1 et 100 mW, et de préférence de 10 mW. Le circuit 6 sera dimensionné pour réduire cette puissance hydraulique tout en conservant la capacité de transport de la charge thermique. En effet, cette puissance hydraulique correspond à la puissance de friction du fluide 5 sur les parois, laquelle se dégrade en chaleur, qu'il faut évacuer en plus de la charge thermique de l'utilisateur 3, et des autres pertes comme les courants de Foucault.

[0028] Dans le cryostat, ce circulateur 2 est de préférence agencé au plus près dans le circuit 6 de la machine cryogénique 5 et en particulier au niveau de la zone d'échange de cette machine 5. Ce circulateur 2 comprend principalement un module d'entraînement 8a, 8b et un module de pompage 9a, 9b pourvu d'une roue centrifuge 10 définie structurellement pour fonctionner à des températures cryogéniques, ainsi que des câbles électriques 11 alimentant le module d'entraînement 8a, 8b. Dans ce circulateur 2, le module d'entraînement 8a, 8b est accouplé magnétiquement 51 au module de pompage 9a, 9b afin d'animer la roue centrifuge 10 d'un mou-

vement rotatif. L'accouplement magnétique 51 constitue une composante du circulateur 2 qui comprend des composantes 18, 28, 29, 38, 39 de ce circulateur 2 qui sont décrites par la suite et qui participent à la transmission d'un mouvement sans contact mécanique, sans apport d'énergie et sans usure au travers d'une enveloppe 12 du module de pompage 9a, 9b de ce circulateur 2.

[0029] Ce module de pompage 9a, 9b comprend donc cette enveloppe 12 qui comporte une enceinte 13 étanche dans laquelle est compris un arbre d'entraînement 14 de la roue centrifuge 10. Une telle roue centrifuge 10 est apte à réaliser un mouvement rotatif susceptible d'entraîner une circulation du fluide frigorigène 4 dans le circuit 6 et en particulier dans cette enceinte 13. Lors de cette circulation, le fluide frigorigène 4 est alors aspiré dans cette enceinte 13 au niveau d'une ouverture d'entrée 15a définie dans l'enveloppe 12 et évacué par une ouverture de sortie 15b de cette enceinte 13. Ces ouvertures 15a, 15b sont reliées au circuit 6 respectivement par des conduites d'entrée et de sortie 16a, 16b du circulateur 2. On notera que l'ouverture d'entrée 15a présente un axe a1 qui est confondu avec des axes centraux a2, a3 de la roue centrifuge 10 et de l'arbre d'entraînement 14. S'agissant de l'ouverture de sortie 15b, elle comprend un axe a4 qui est de préférence dans un plan perpendiculaire à l'axe a1 de l'ouverture d'entrée 15a. Dans cette enveloppe 12, l'arbre d'entraînement 14 de la roue centrifuge 10 est pourvu de deux extrémités 17a, 17b dont une, la première extrémité 17a, comprend cette roue centrifuge 10 fixée par collage, emboîtement ou encore vissage. Cet arbre d'entraînement 14 comporte également un rotor magnétique 18 pourvu d'au moins un élément magnétique 19 notamment un aimant permanent cylindrique unique en particulier un gros aimant permanent ou encore au moins deux aimants permanents de polarités opposées par exemple deux petits aimants permanents. L'élément magnétique 19 présente de préférence une aimantation qui peut être paramétrée selon le couple requis pour entraîner la roue centrifuge 10 dans un mouvement de rotation. Dans le présent mode de réalisation, cette aimantation est partielle car le couple requis est faible du fait que la puissance hydraulique nécessaire le soit et la puissance mécanique à exercer sur l'arbre d'entraînement 14 aussi. On notera que si l'aimantation choisie est totale au lieu de partielle, on limite le volume magnétique des aimants en conséquence.

[0030] Cette enveloppe 12 du module de pompage 9a, 9b comprend une volute 20 et un carter 21. Ce carter 21 autrement appelé « *cloche* » ou encore « *cloche d'étanchéité* », est défini pour loger le rotor magnétique 18 monté sur l'arbre d'entraînement 14 et constitue une partie de l'enveloppe 12 ayant la forme générale d'un tube cylindrique. Ce carter 21 présente des caractéristiques liées à une génération faible de courants de Foucault lorsqu'il est exposé à un champ magnétique variable. Il est de préférence de faible épaisseur comme il est décrit par la suite. De plus, il présente des propriétés de résistance à la pression interne notamment à des pres-

sions inférieures à 50 bars. En complément, ce carter 21 est en matériau métallique présentant des propriétés de faible conductivité électrique, il peut être par exemple en inox ou encore en alliage de titane conservant une faible conductivité électrique sur toute la gamme de températures de travail, y compris à 5K. On notera que ce matériau métallique présente une structure non feuilletée, incompatible avec l'étanchéité requise.

[0031] La volute 20 comprend les ouvertures d'entrée et de sortie 15a, 15b de l'enceinte 13 de cette enveloppe 12. Cette volute 20 définit une partie de l'enceinte 13 de l'enveloppe 12 dans laquelle est agencée la roue centrifuge 10 située sur la première extrémité 17a de l'arbre d'entraînement 14. S'agissant du carter 21, il définit également une partie de l'enceinte 13 de cette enveloppe 12 dans laquelle est situé le rotor magnétique 18 monté sur l'arbre d'entraînement 14.

[0032] Le module de pompage 9a, 9b comporte également un dispositif palier 22 encore appelé « pivoterie » supportant l'arbre d'entraînement 14 de la roue centrifuge 10 et qui est situé dans l'enveloppe 12 en partie dans la volute 20 et dans le carter 21. Ce dispositif palier 22 est notamment défini pour encaisser les efforts résultant de la rotation de cet arbre d'entraînement 14 pourvu de la roue centrifuge 10. Ce dispositif palier 22 comprend deux roulements 23a, 23b ou groupes de roulement appelés par la suite premier et de deuxième roulement 23a, 23b. Ces roulements 23a, 23b qui sont des roulements de précision, peuvent être de toutes natures connues appropriées pour fonctionner à des températures cryogéniques notamment inférieures à 5K et supporter une charge axiale et une charge radiale, il peut s'agir par exemple de roulements froids encore appelés roulements cryogéniques. Ces roulements 23a, 23b permettent de supporter, guider et centrer l'arbre d'entraînement 14 dans l'enveloppe 12 du module de pompage 9a, 9b.

[0033] Dans le circulateur 2, l'enveloppe 12 et en particulier le carter 21 délimite l'enceinte 13 de ce circulateur 2. Le module d'entraînement 8a, 8b de ce circulateur 2 est agencé dans cette partie.

[0034] En référence aux figures 1, 2A et 2B, ce circulateur 2 peut être réalisé selon deux variantes dans lesquelles les modules d'entraînement et de pompage 8a, 8b, 9a, 9b sont différents.

[0035] Dans la première variante dont les modules d'entraînement et de pompage 8a, 9a sont visibles sur la figure 2A, l'enveloppe 12 peut résulter d'un assemblage étanche de la volute 20 avec le carter 21 ou encore être une pièce monobloc. L'arbre d'entraînement 14 du module de pompage 9a agencé dans cette enveloppe 12, s'étend du sommet 24 de ce carter 21 vers l'ouverture d'entrée 15a en étant supporté par le dispositif palier 22 comprenant les premier et deuxième roulements 23a, 23b. Dans cette variante, ces premier et deuxième roulements 23a, 23b sont de préférence des roulements froids. Sur cet arbre d'entraînement 14, le premier roulement 23a est monté sur la deuxième extrémité 17b de l'arbre d'entraînement 14. Sur cet arbre d'entraînement

14, ces premier et deuxième roulements 23a, 23b sont agencés de manière à ce qu'un écart est défini entre eux pour l'agencement du rotor magnétique 18 sur l'arbre d'entraînement 14. Autrement dit, le rotor magnétique 18 est dans cette variante, agencé entre ces deux roulements 23a, 23b. Dans cette configuration, on notera que le rotor magnétique 18 et tout ou partie du dispositif palier 22 sont agencés dans la carter 21 de l'enveloppe 12.

[0036] Dans cette variante, le module d'entraînement 8a comporte un moteur électrique 25 relié à une source d'énergie électrique par l'intermédiaire des câbles électriques 11. Ce moteur 25 peut être choisi parmi des moteurs électriques de l'état de la technique tels que des moteurs à courant alternatif ou courant continu à balais ou encore des moteurs à courant continu sans balai encore appelé « *moteur brushless* » ou moteur « *pas à pas* ». Ce moteur 25 comprend un arbre moteur 26 pourvu d'une extrémité libre comprenant un élément de support 27 d'au moins deux éléments magnétiques 28 de polarités opposées notamment d'au moins deux aimants permanents. Cet arbre moteur 26 comprend un axe central a5 qui est confondu avec l'axe a3 de l'arbre d'entraînement 14. Cet élément de support 27 est défini pour entourer la circonférence de tout ou partie du carter 21. Cet élément de support 27 peut être de forme circulaire ou tubulaire, il peut s'agir par exemple d'une calotte, d'une coupole, d'un tube borgne ou encore d'un anneau. Chaque élément magnétique 28 est agencé sur une partie latérale 29 de cet élément de support 27 en regard avec une paroi périphérique du carter 21, de manière à ce que des axes centraux a7, a8 de chaque élément magnétique 28 et du rotor magnétique 18 sont confondus. Autrement dit, dans un tel agencement, chaque élément magnétique 28 et le rotor magnétique 18 sont alignés entre eux suivant ces axes centraux a7, a8. Dans ce contexte, on notera que la carter 21 présente une épaisseur fine comprise entre 300 et 600 μm , et qui est de préférence de 300 μm et ce, de sorte que la génération de courants de Foucault soit minimisée. L'entrefer présent entre le rotor magnétique 18 et chaque élément magnétique 28 de l'élément de support 27 doit être suffisamment faible par exemple de l'ordre de quelques millimètres au maximum, afin d'assurer l'accouplement magnétique 51 entre les modules d'entraînement et de pompage 8a, 9a.

[0037] Ainsi dans cette configuration, les modules d'entraînement et de pompage 8a, 9a sont accouplés magnétiquement 51 entre eux par l'intermédiaire de l'élément de support 27 pourvu d'au moins deux éléments magnétiques 28 de polarités opposées relié au moteur 25 par l'arbre moteur 26, et le rotor magnétique 18 monté sur l'arbre d'entraînement 14 de la roue centrifuge 10. Effectivement, chaque élément magnétique 28 de l'élément de support 27 en étant mis en rotation par le moteur 25 du module d'entraînement 8a provoque la mise en rotation de la roue centrifuge 10 en étant accouplé magnétiquement 51 au rotor magnétique 18.

[0038] Dans la deuxième variante dont les modules

d'entraînement et de pompage 8b, 9b sont visibles sur la figure 2B, l'enveloppe 12 est formée par l'assemblage de la volute 20 et du carter 21. Le carter 21 du rotor magnétique 18 et la volute 20 sont assemblés l'un avec l'autre de manière à définir l'enceinte 13 de l'enveloppe 12. Pour ce faire, la volute 20 et le carter 21 comprennent chacun une zone de liaison avec la bride de fixation 30 correspondante définie dans le cryostat. La zone de liaison est pourvue d'une gorge 31, 32 dans laquelle est situé un élément d'étanchéité 33, 34 de type joint torique de manière à ce que l'élément d'étanchéité 33, 34 est localisé entre cette zone de liaison et la bride 30. On notera que ce joint torique peut appartenir à la famille de joints HELICOFLEXTM permettant d'assurer une étanchéité aux températures cryogéniques.

[0039] La zone de liaison de la volute 20 est reliée mécaniquement à la bride 30 par des éléments de liaison 35 tels que des vis. La cloche d'étanchéité 21 en alliage de titane est soudée à la bride 30 ou taillée dans la masse avec elle.

[0040] L'arbre d'entraînement 14 du module de pompage 9b agencé dans cette enveloppe 12, s'étend du sommet 24 du carter 21 vers l'ouverture d'entrée 15a en étant supporté par le dispositif palier 22 comprenant les premier et deuxième roulements 23a, 23b. Ce dispositif palier 22 est pourvu d'une composante de support 36 dans laquelle sont situés ces premier et deuxième roulements 23a, 23b et un ressort 37 de précontrainte qui les maintient axialement écartés l'un de l'autre dans cette composante 36. Cette composante de support 36 est montée en partie dans le carter 21 de manière à être maintenu dans une position fixe. Cette composante de support 36 est située sur l'arbre d'entraînement 14 entre le rotor magnétique 18 et la roue centrifuge 10. Cette roue centrifuge 10 et ce rotor magnétique 18 sont dans cette variante respectivement montés sur les première et deuxième extrémités 17a, 17b de l'arbre d'entraînement 14. Dans cette configuration, on notera que le rotor magnétique 18 et tout ou partie du dispositif palier 22 sont agencés dans le carter 21.

[0041] Dans cette variante, le module d'entraînement 8b comporte un stator magnétique 38 pouvant comprendre au moins deux électro-aimants 39 permettant de créer un champ magnétique tournant autour de la circonférence du carter 21 de manière à coopérer avec le rotor magnétique 18. Le stator magnétique 38 est agencé au niveau de la paroi périphérique de ce carter 21, de manière à ce que des axes centraux a7, a9 de ce stator magnétique 38 et du rotor magnétique 18 sont confondus. Autrement dit, dans un tel agencement, le stator et le rotor magnétique 38, 18 sont alignés entre eux suivant ces axes centraux a7, a9. Dans ce contexte, on notera que le carter 21 présente une épaisseur fine comprise entre 300 et 600 μm , et qui est de préférence de 300 μm et ce, de sorte que la génération de courants de Foucault soit minimisée. L'entrefer présent entre le rotor magnétique 18 et le stator magnétique 38 doit être suffisamment faible, par exemple de l'ordre de quelques millimètres au

maximum, afin d'assurer un couplage magnétique suffisant.

[0042] Ce stator magnétique 38 est relié à une source d'énergie électrique par l'intermédiaire des câbles électriques 11. On notera que le contrôle de l'alimentation électrique permettant de faire varier le mouvement rotatif de la roue centrifuge 10 peut être réalisé avec ou sans capteur de position rotorique. En particulier, des technologies sans capteurs (« *sensorless* ») connues de l'état de la technique et qui sont basées sur la mesure de paramètres électriques et/ou de paramètres variant en fonction de la position du rotor peuvent être mises en oeuvre dans la présente invention. On notera que les sondes à effet Hall utilisées classiquement comme capteurs de position dans les moteurs Brushless ne fonctionnent pas à basse température.

[0043] Dans cette configuration, on notera que dans cette variante du circulateur 2, le stator magnétique 38 et le rotor magnétique 18 monté sur l'arbre d'entraînement 14, bien que séparés par la cloche d'étanchéité 21, forment ensemble un moteur électrique, notamment un moteur présentant des caractéristiques de fonctionnement qui sont similaires à celles d'un moteur tournant en particulier d'un moteur synchrone de type moteur « *brushless* ».

[0044] Ainsi, dans cette deuxième variante, les modules d'entraînement et de pompage 8b, 9b sont accouplés magnétiquement entre eux par l'intermédiaire du stator magnétique 38 qui est apte à générer un champ tournant en direction du rotor magnétique 18 monté sur l'arbre d'entraînement 14 afin de provoquer la mise en rotation de la roue centrifuge 10.

[0045] Dans la deuxième variante, le rotor du moteur est noyé dans le fluide. Ceci est rendu possible en interposant le carter 21 (ou cloche étanche) entre le rotor et le stator. Ceci permet de simplifier l'accouplement magnétique. Tout se passe comme si l'on remplaçait une cloche externe de coupleur magnétique et son moteur de mise en rotation par un unique stator de moteur brushless.

[0046] De préférence, dans la deuxième variante, le carter 21 (ou cloche étanche) est optimisé. En particulier, son épaisseur est réduite autant que le permet la tenue à la pression interne. Le carter est par exemple réalisé en métal, notamment en inox ou titane. Le matériau du carter est choisi pour être aussi résistif que possible selon la plage de température, afin de lutter contre le développement de courants de Foucault générateurs de charge thermique. Le carter étanche 21 entre le rotor et le stator est par exemple réalisé dans un matériau à résistivité électrique supérieure à $0,5 \mu\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ à la température de travail, c'est-à-dire à une température inférieure à 30K, voire inférieure à 25K. Un matériau isolant électrique sera avantageusement utilisé, du moment qu'il procure l'étanchéité requise à température cryogénique (typiquement inférieure à 30K, voire inférieure à 25K), le circulateur étant entouré par un vide secondaire à 10^{-6} mbar.

[0047] Le carter étanche 21 entre le rotor et le stator

a de préférence un diamètre aussi petit que possible (pour limiter les courants de Foucault), idéalement inférieur ou égal à 12 mm.

[0048] Le carter étanche 21 entre le rotor et le stator a une épaisseur aussi faible que possible (pour limiter les courants de Foucault), par exemple inférieure ou égale à 0,5 mm.

[0049] De préférence, dans la deuxième variante, le stator fonctionne sous un même vide qu'évoqué précédemment, à savoir de l'ordre de 10^{-6} mbar. La puissance thermique du stator (due à l'effet Joule et à des pertes magnétiques diverses) est donc par exemple évacuée par contact du stator avec le carter 21, lui-même en contact thermique avec le fluide cryogénique. Pour cela, le stator est avantageusement monté juste glissant sur le carter. Ainsi, le stator comprend un alésage dans lequel est logé le carter 21. Par exemple, un jeu inférieur ou égal à 0.05 mm peut être prévu entre le carter et le stator, notamment entre le carter et l'alésage du stator. Ce jeu réduit permet d'assurer un bon transfert de chaleur entre le rotor et le carter 21. L'alésage du stator peut être réalisé par un moulage d'un matériau synthétique, par exemple une résine epoxy, en particulier Stycast®. Le matériau synthétique peut être chargé par un constituant à forte conductivité thermique pour améliorer sa conductivité thermique.

[0050] De préférence, dans la deuxième variante, la vitesse de rotation du rotor est volontairement fortement réduite pour réduire les courants de Foucault développés dans le carter 21. Par exemple, la vitesse de rotation est aussi basse que possible (pour limiter les courants de Foucault). En particulier, la vitesse de rotation est idéalement inférieure à 50Hz. Elle reste toutefois compatible avec la production d'un débit massique de fluide cryogénique suffisant.

[0051] De préférence, dans la deuxième variante, l'entrefer stator/rotor est volontairement augmenté et/ou l'aimantation des aimants volontairement réduite pour lutter contre les courants de Foucault. La conception du moteur est ici inhabituelle car on ne cherche pas obtenir un moteur le plus performant ou le plus efficace possible pour une quantité d'énergie électrique donnée. On cherche ici à obtenir un moteur qui perturbe le moins possible la boucle caloporteuse, c'est-à-dire qui chauffe le moins possible le fluide cryogénique. Par exemple, l'entrefer rotor-stator est plus grand que strictement nécessaire pour y loger le carter étanche afin de diminuer la valeur du champ magnétique au niveau du carter. Ceci permet de limiter les courants de Foucault. Par exemple, l'entrefer rotor-stator est supérieur à 3 mm.

[0052] De préférence, dans la deuxième variante, dans le même but, le diamètre du rotor est limité (pour limiter les courants de Foucault). Par exemple, le diamètre du rotor est inférieur ou égal à 6 mm. La limitation du volume magnétique doit demeurer compatible avec la production d'un couple mécanique suffisant pour le démarrage de la roue centrifuge, les frottements résiduels dans le palier, ainsi que le couple résistant hydraulique.

Avantageusement, le rotor comprend un aimant dipolaire de faible diamètre, par exemple inférieur à 6 mm. La présence de seulement deux pôles, relativement éloignés (par exemple entre 2 et 3 mm) du carter étanche permet de limiter (à vitesse de rotation donnée) la production de courants de Foucault en minimisant les variations de champ magnétique vues par le carter.

[0053] De préférence, dans la deuxième variante, le moteur est du type "brushless" avec un rotor à aimants permanents. Le fonctionnement à températures cryogéniques rend inopérant un pilotage du moteur basé sur des sondes à effet Hall. Le pilotage du moteur est donc de préférence réalisé "en boucle ouverte".

[0054] Dans les différentes variantes, la réalisation du palier de guidage de la roue centrifuge est un élément critique. En effet, les basses températures interdisent toute lubrification classique. Ainsi, le palier est de préférence réalisé par des roulements secs montés dans des bagues en polychlorotrifluoroéthylène, notamment en Kel-F® ou Neoflon®, ou en Vespel®, pour garder un peu de souplesse vis à vis de la contraction différentielle des divers matériaux lors de la mise à très basse température (typiquement inférieure à 30K).

[0055] De préférence, dans la deuxième variante, la pivoterie est constituée par deux roulements de type "cryogéniques". Les jeux dans ces roulements à température ambiante (300K) sont importants et sont réduits par contraction des composants pour arriver à une valeur optimale de bon fonctionnement à la température cryogénique de travail (typiquement inférieure ou égale à 30K). Le jeu optimal de fonctionnement minimise le couple de résistance à la rotation de la roue centrifuge et maximise la durée de vie. Ces roulements sont choisis de taille aussi petite que possible, idéalement de diamètre inférieur à 7 mm, afin de limiter le couple de frottement et le besoin en couple moteur. Les roulements sont avantageusement du type à gorge profonde et à montage en O. Bien entendu ces roulements pourraient être aussi à montage en X.

[0056] De préférence, dans le deuxième mode de réalisation, le ressort 37 exerce une précharge axiale sur les deux roulements, notamment une précharge axiale de 1 N. La raideur du ressort est choisie de façon qu'à la mise à très basse température (typiquement inférieure à 30K), la valeur de cette précharge ne varie pas de plus de 10% par suite des variations dimensionnelles.

[0057] De préférence, dans le deuxième mode de réalisation, le montage du rotor est du type "cantilever", c'est-à-dire que le rotor est monté en porte à faux par rapport aux deux roulements.

[0058] De préférence, dans le deuxième mode de réalisation, contrairement à certains circulateurs industriels dont le moteur reste à température ambiante quand la roue et la volute sont à température cryogénique, le circulateur constitue un ensemble isotherme ou sensiblement isotherme fonctionnant à la température cryogénique de travail (typiquement inférieure ou égale à 30K). Le circulateur est avantageusement installé au même

niveau, soit à la même altitude, que la source froide, en particulier au bout froid 5' de la machine cryogénique de type « tube à gaz pulsé ». Par ailleurs, le circulateur est avantageusement couplé thermiquement à la source froide. Ce couplage peut être réalisé par un barreau de cuivre. Le circulateur est ainsi en permanence maintenu à la température la plus basse et la roue entraîne ainsi toujours le fluide le plus froid et le plus dense. On évite ainsi des désamorçages du circulateur et/ou la formation de « bouchons » gazeux au niveau des points bas des circuits.

[0059] Dans le circulateur 2, on notera que dans la première variante, l'accouplement magnétique 51 comprend lesdits au moins deux éléments magnétiques 28 de polarités opposées agencés dans l'élément de support 27 et le rotor 18 monté sur l'arbre d'entraînement 14. Concernant la deuxième variante, cet accouplement magnétique 51 comprend le stator magnétique 38 agencé au niveau de la paroi périphérique de ce carter 21 et le rotor 18.

[0060] De plus, dans ces deux variantes du circulateur 2, la roue centrifuge 10 en réalisant ainsi un mouvement rotatif engendre la circulation du fluide frigorigène 4 dans le circuit 6 de l'installation cryogénique 1, le fluide 4 est alors aspiré par l'ouverture d'entrée 15a pour circuler dans l'enceinte 13 de l'enveloppe 12 et être évacué de cette dernière par l'ouverture de sortie 15b vers la machine cryogénique 5. Lorsque le fluide frigorigène 4 circule dans l'enceinte 13, l'arbre d'entraînement 14, le rotor magnétique 18 et le dispositif palier 22 avec ses roulements 23a, 23b baignent alors dans ce fluide 4.

[0061] Ainsi l'invention contribue à améliorer le fonctionnement de l'installation cryogénique 1 à des températures cryogéniques inférieures à 120K, notamment en réduisant les pertes thermiques résultant du circulateur 2. De plus dans cette invention, le circulateur 2 peut être configuré pour fonctionner dans une installation cryogénique 1 dans laquelle la puissance hydraulique requise et la puissance mécanique devant être exercée sur l'arbre d'entraînement 14 sont faibles.

Revendications

1. Circulateur (2) assurant une circulation d'un fluide frigorigène (4) dans un circuit (6) d'une installation cryogénique (1) depuis et vers un élément (3) présentant une charge thermique, le circulateur (2) comportant un module d'entraînement (8a, 8b) et un module de pompage (9a, 9b) pourvu d'une roue centrifuge (10), ledit module d'entraînement (8a, 8b) étant accouplé magnétiquement (51) audit module de pompage (9a, 9b) afin d'animer ladite roue centrifuge (10) d'un mouvement rotatif, **caractérisé en ce que** le module de pompage (9a, 9b) comprend une enveloppe (12) définissant une enceinte (13) étanche dans laquelle est compris un arbre d'entraînement (14) de la roue centrifuge (10) et **en ce que** l'enve-

loppe (12) comprend un carter (21) du rotor magnétique (18) et une volute (20).

2. Circulateur (2) selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** le module de pompage (9a, 9b) comprend l'arbre d'entraînement (14) comportant un rotor magnétique (18) ainsi que ladite roue centrifuge (10) en une première extrémité (17a).
3. Circulateur (2) selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le module de pompage (9a, 9b) comprend un dispositif palier (22) supportant l'arbre d'entraînement (14) de la roue centrifuge (10) et comprenant des premier et deuxième roulements (23a, 23b), notamment des roulements cryogéniques.
4. Circulateur (2) selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** le rotor magnétique (18) est agencé à l'extérieur des deux roulements (23a, 23b) du dispositif palier (22) en étant monté sur l'arbre d'entraînement (14) de la roue centrifuge (10).
5. Circulateur (2) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** le module d'entraînement (8b) comprend un stator magnétique (38), notamment un stator magnétique comportant au moins deux électroaimants (39), agencé autour d'une circonférence de tout ou partie du carter (21) du rotor magnétique (18) de l'enveloppe (12) du module de pompage (9b) de manière à coopérer avec ledit rotor magnétique (18).
6. Circulateur (2) selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** le stator magnétique (38) et le rotor magnétique (18) monté sur l'arbre d'entraînement (14) forment ensemble un moteur électrique, notamment un moteur présentant des caractéristiques de fonctionnement sensiblement similaires à celles d'un moteur tournant.
7. Circulateur (2) selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le circulateur est un mini-circulateur.
8. Installation cryogénique (1) pour un refroidissement d'un élément (3) présentant une charge thermique comprenant un circulateur (2) selon l'une quelconque des revendications précédentes assurant une circulation d'un fluide frigorigène (4) dans un circuit (6) de cette installation cryogénique (1) depuis et vers ledit élément (3).
9. Installation cryogénique (1) selon la revendication précédente, **caractérisée en ce qu'elle** comprend au moins une machine cryogénique (5) de type tube à gaz pulsé et une unité de compression et de contrôle (7).

10. Installation cryogénique (1) selon l'une quelconque des revendications 8 et 9, **caractérisée en ce qu'**elle comprend un cryostat pourvu d'une enceinte entretenue sous un vide d'isolement.

5

11. Installation cryogénique (1) selon la revendication précédente, **caractérisée en ce que** le cryostat comprend le circulateur (2), la machine cryogénique (5) et le circuit (6).

10

12. Installation cryogénique (1) selon l'une des revendications 8 à 11, **caractérisée en ce qu'**elle comprend une source froide (5'), notamment un bout froid (5') d'une machine cryogénique de type « tube à gaz pulsé », le circulateur étant monté au même niveau ou à la même altitude que la source froide, en particulier la roue centrifuge étant montée au même niveau ou à la même altitude que le bout froid (5') de la machine cryogénique de type « tube à gaz pulsé ».

15

20

25

30

35

40

45

50

55

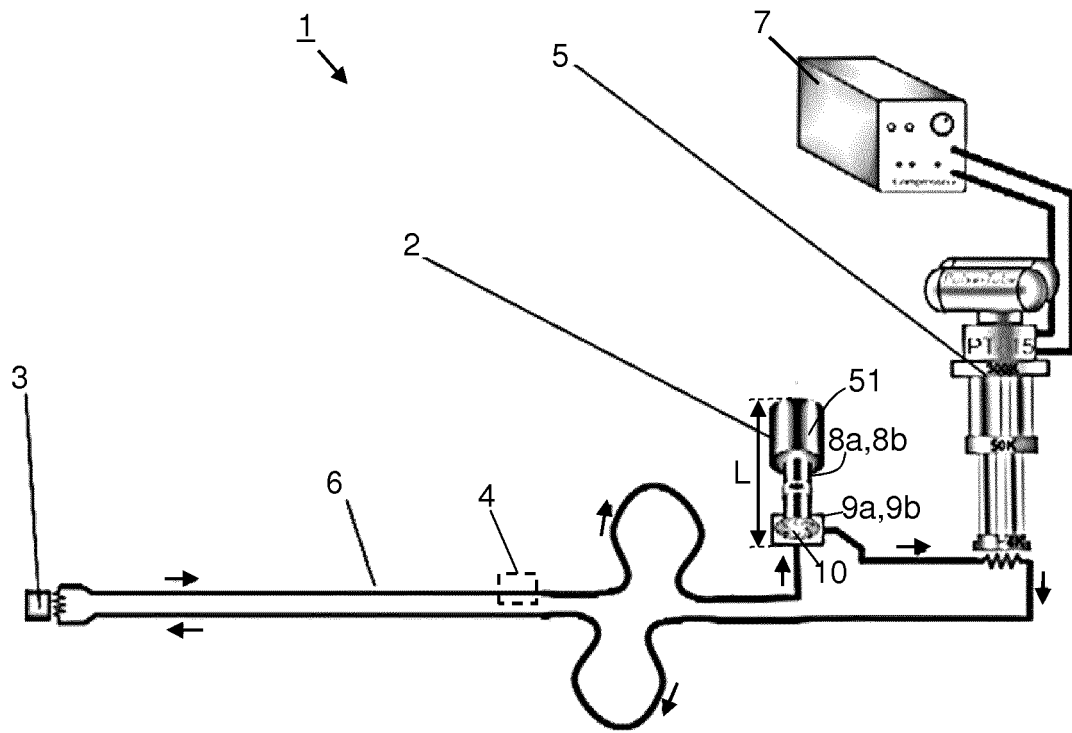


FIGURE 1

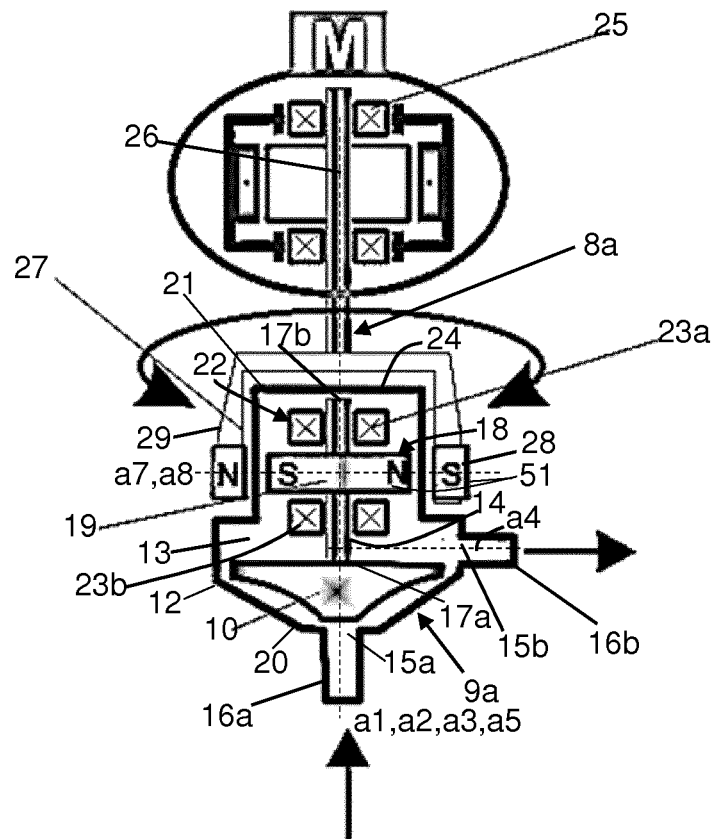


FIGURE 2A

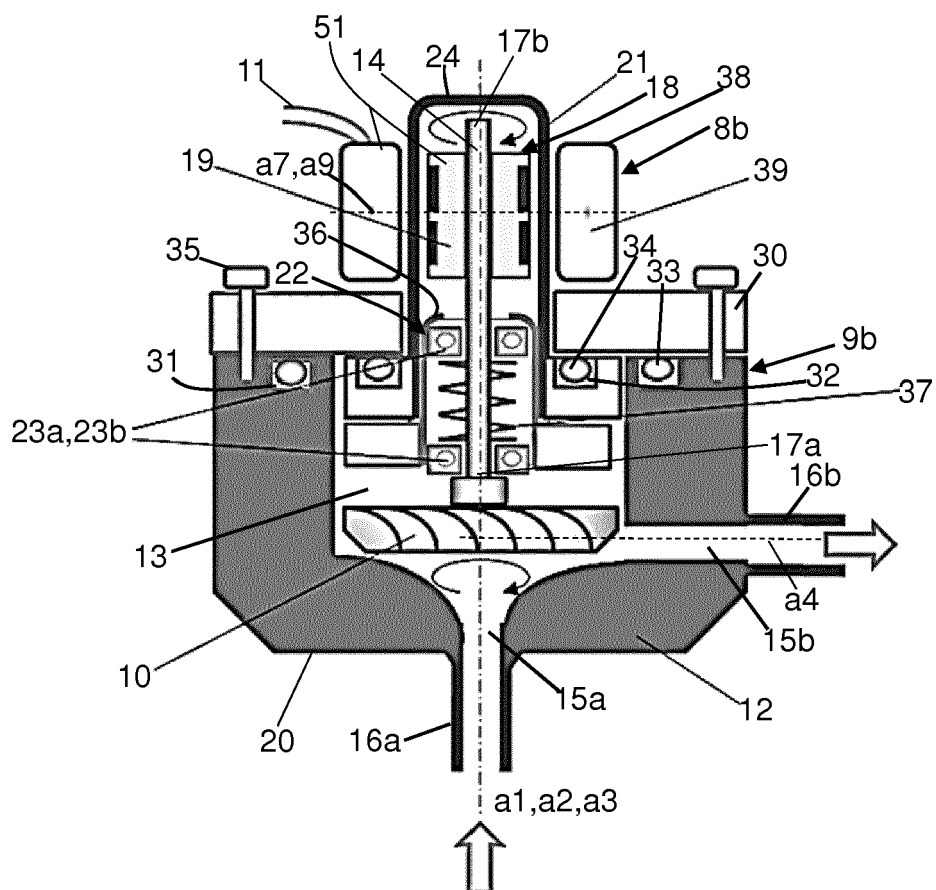


FIGURE 2B



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 18 16 3528

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	US 4 487 557 A (RUYAK ROBERT F [US] ET AL) 11 décembre 1984 (1984-12-11)	1-7	INV. F25B9/14 F25B25/00 F25D17/02 F04D7/02 F04D13/02 ADD. F04B15/08
Y	* colonne 2, ligne 56 - colonne 4, ligne 41; figures 1,2 *	8-12	
X	EP 2 306 028 A2 (SUNDYNE CORP [US]) 6 avril 2011 (2011-04-06) * alinéas [0011] - [0013]; figure 1.2 *	1-7	
Y	EP 1 519 124 A2 (PRAXAIR TECHNOLOGY INC [US]) 30 mars 2005 (2005-03-30) * alinéas [0022] - [0027]; figures 1,2 *	8-12	
A	US 6 213 736 B1 (WEISSER G LOUIS [US]) 10 avril 2001 (2001-04-10) * le document en entier *	1-7	
A	US 2015/143822 A1 (CHALMERS DENNIS W [US] ET AL) 28 mai 2015 (2015-05-28) * alinéas [0043] - [0063]; figures 1,2 *	1-7	
A	US 2006/130493 A1 (STROBEL MARCO [DE]) 22 juin 2006 (2006-06-22) * alinéas [0032] - [0033]; figures 1-4 *	8-12	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) F25B F25D F04D F04B
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 24 juillet 2018	Examineur Léandre, Arnaud
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			

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

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

EP 18 16 3528

5 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.

24-07-2018

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 4487557 A	11-12-1984	AUCUN	
EP 2306028 A2	06-04-2011	BR PI0518617 A2 CN 101076936 A CN 101860146 A EP 1820254 A2 EP 2306028 A2 JP 4854673 B2 JP 2008523309 A KR 20070089678 A US 2006127253 A1 US 2010156220 A1 US 2013106018 A1 WO 2006062943 A2	25-11-2008 21-11-2007 13-10-2010 22-08-2007 06-04-2011 18-01-2012 03-07-2008 31-08-2007 15-06-2006 24-06-2010 02-05-2013 15-06-2006
EP 1519124 A2	30-03-2005	EP 1519124 A2 JP 2005098688 A US 2005061006 A1	30-03-2005 14-04-2005 24-03-2005
US 6213736 B1	10-04-2001	AUCUN	
US 2015143822 A1	28-05-2015	CN 106133326 A EP 3074634 A2 KR 20160090386 A US 2015143822 A1 WO 2015081314 A2	16-11-2016 05-10-2016 29-07-2016 28-05-2015 04-06-2015
US 2006130493 A1	22-06-2006	DE 102004060832 B3 GB 2422422 A US 2006130493 A1	14-06-2006 26-07-2006 22-06-2006

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