



(11)

EP 3 163 221 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
03.05.2017 Bulletin 2017/18

(51) Int Cl.:
F25B 9/00 (2006.01)
F25D 29/00 (2006.01)
F17C 13/02 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **16193760.2**

(22) Date de dépôt: **13.10.2016**

(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:
MA MD

(30) Priorité: **14.10.2015 FR 1559773**

(71) Demandeur: **COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES**
75015 Paris (FR)

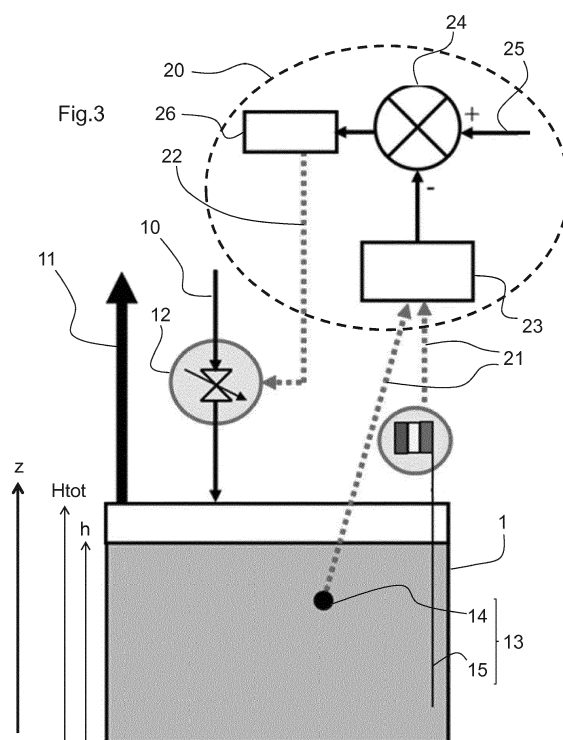
(72) Inventeurs:
• **ROUSSET, Bernard**
38690 CHABONS (FR)
• **BONNE, François**
38000 GRENOBLE (FR)
• **HOAREAU, Violette**
38000 GRENOBLE (FR)

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

(54) PROCÉDÉ DE RÉGULATION D'UN SYSTÈME DE REFOUILLISSEMENT CRYOGENIQUE

(57) Procédé de régulation d'un système de refroidissement cryogénique comportant un bain cryogénique (1) pourvu d'un conduit d'amenée (10) d'un fluide cryogénique à l'état liquide, diphasique ou supercritique et d'un conduit d'évacuation (11) d'un fluide cryogénique à l'état vapeur, lesdits conduits étant reliés à un refroidisseur cryogénique, caractérisé en ce que le procédé de régulation met en oeuvre les étapes suivantes :

- Mesure d'une ou plusieurs grandeur(s) directement au niveau du bain cryogénique permettant de déduire la masse totale de fluide cryogénique au sein du bain cryogénique ;
- Asservissement de la masse totale de fluide cryogénique au sein du bain cryogénique à une masse de consigne, à partir de la mesure précédente.



Description

[0001] L'invention porte sur un procédé de régulation d'un système de refroidissement cryogénique, et sur un système de refroidissement cryogénique en tant que tel qui met en oeuvre un tel procédé. L'invention concerne en particulier les systèmes de refroidissement pouvant délivrer des puissances frigorifiques (moyennes et/ou de crête) importantes, de plusieurs dizaines à plusieurs milliers de watts.

[0002] Les systèmes de refroidissement cryogéniques, tels que les refroidisseurs à hélium, sont généralement conçus pour fournir une puissance frigorifique constante. Ils sont donc particulièrement adaptés aux charges thermiques stationnaires ou faiblement variables dans le temps. Cependant, certaines applications nécessitent des puissances frigorifiques importantes et fortement variables. On peut citer par exemple le refroidissement des aimants supraconducteurs de certaines installations scientifiques, tels que les tokamaks destinés à l'étude de la fusion nucléaire. A titre d'exemple, le système de refroidissement du tokamak japonais JT-60SA délivre une puissance frigorifique moyenne de 6 kW et une puissance de crête de 12 kW. Si le refroidisseur fonctionnait constamment à sa puissance maximale, cela se traduirait - sur une durée d'un an - par une surconsommation électrique de plus de 10 GWh. Le graphique de la figure 1 montre la puissance thermique instantanée $P(t)$, qui présente une variation temporelle cyclique, et la puissance thermique moyenne dissipées par un aimant supraconducteur dudit tokamak JT-60SA.

[0003] Il existe essentiellement deux possibilités pour gérer de fortes charges thermiques pulsées : soit concevoir des refroidisseurs adaptés à des variations importantes de la puissance frigorifique fournie, soit « lisser » temporellement les charges thermiques pour éviter qu'elles ne se répercutent sur le refroidisseur.

[0004] La figure 2 illustre la structure d'un système de refroidissement permettant de lisser les charges thermiques, par exemple celles provenant des aimants supraconducteurs, qui constituent des charges thermiques pulsées ST. Ces charges thermiques sont refroidies par un fluide caloporteur (hélium supercritique), par l'intermédiaire d'un premier échangeur de chaleur X1, qui circule dans un circuit primaire CFP et cède la chaleur absorbée à un bain cryogénique BC comprenant de l'hélium diphasique, liquide et vapeur, par l'intermédiaire d'un second échangeur de chaleur X2. Ce bain cryogénique est ouvert, relié à un refroidisseur/liquéfacteur d'hélium RL fonctionnant selon le cycle de Claude (voir J.-C. Boissin et al. « Cryogénie : mise en oeuvre des basses températures », Techniques de l'Ingénieur, B 2 382). Un tel refroidisseur comprend une zone de compression et une zone froide (« boîte froide ») couplées par des vannes. Le rôle de la zone de compression (compresseur P) est de fournir un débit de gaz (hélium) sous une haute pression, par exemple de 15 à 25 bars environ. Le rôle de la zone froide est de fournir une puissance frigorifique pour maintenir en froid une installation. Elle est constituée de plusieurs échangeurs à contre courant HX1 - HX5 qui permettent un échange de chaleur entre les canaux basse pression (BP) et haute pression (HP), de turbines T1 et T2 dans lesquelles une partie de l'énergie thermique du gaz est convertie en travail, et d'une vanne de détente Joule Thomson VJT à l'extrémité du canal haute pression HP. En sortie de cette vanne de détente, l'hélium est partiellement liquéfié (LHe) et alimente le bain cryogénique BC ; de manière concomitante, de l'hélium à l'état de vapeur (VHe) est évacué vers le canal basse pression BP. La source thermique pulsée ST (aimant supraconducteur) est refroidie par l'intermédiaire du circuit fluide primaire CFP dans lequel circule de l'hélium supercritique.

[0005] Si aucun amortissement des variations de la charge thermique n'était prévu, le refroidisseur RL serait sujet à des dysfonctionnements graves, pouvant conduire à des arrêts de sécurité, voire à des pannes. Par exemple, une augmentation de la charge provoquerait une augmentation du débit froid de retour, et donc une augmentation de pression en entrée et en sortie du compresseur C, pouvant induire une surcharge thermique de son moteur, une variation inadmissible de la pression de sortie etc. En outre, un refroidissement brutal se produirait au niveau des turbines de détente, ce qui pourrait induire la condensation de gouttelettes liquides créant un balourd susceptible de détruire les turbines. Ces différentes réactions à une forte augmentation transitoire du débit de retour (vapeur froide) peuvent donc provoquer l'arrêt complet du refroidisseur, que ce soit par une panne réelle ou sur un déclenchement de seuil de sécurité. Pour éviter ces variations, une solution de l'état de la technique, par exemple décrite dans le document WO2013088303, est basée sur la régulation de la circulation du fluide du bain vers le refroidisseur et inversement pour maintenir un débit massique constant et un fonctionnement du refroidisseur à charge thermique constante, à partir de la mesure de la hauteur de liquide dans le bain massique et d'un débit d'entrée ou de sortie du bain cryogénique vers le refroidisseur RL.

[0006] Le document WO2013088303 décrit aussi un mode de réalisation qui prévoit la variation de la température et de la pression au sein du bain cryogénique : dans ce cas, la mesure de la hauteur de liquide au sein du bain ne permet plus d'en déduire la quantité massique de fluide cryogénique dans le bain car le liquide saturé a alors une masse variable avec la température et la pression. Ainsi, ce document propose dans une telle situation une régulation des débits d'entrée ou de sortie du bain cryogénique vers le refroidisseur RL. Il propose de plus des mécanismes de régulation et de correction complémentaires pour améliorer la stabilité et la performance du système.

[0007] L'invention vise à améliorer les solutions de l'état de la technique. Plus précisément, elle vise à permettre la régulation d'un système de refroidissement cryogénique comprenant un bain ouvert saturé de liquide/-vapeur de manière à « lisser » les variations temporelles d'une charge thermique non stationnaire, notamment présentant un fonctionnement cyclique, c'est-à-dire périodique ou quasi-périodique. On entend par « quasi-périodique » un régime de fonctionnement

dans lequel la charge thermique prend périodiquement, à des instants dénommés « fins de cycle », une même valeur (par exemple : zéro) sans pour autant être strictement périodique ; par exemple, la puissance dissipée d'un cycle à l'autre peut varier de $\pm 10\%$, voire plus.

[0008] Ainsi, un objet général de l'invention est de proposer une solution améliorée de refroidissement cryogénique, notamment adaptée au refroidissement d'une charge thermique non stationnaire.

[0009] A cet effet, l'invention repose sur un procédé de régulation d'un système de refroidissement cryogénique comportant un bain cryogénique pourvu d'un conduit d'amenée d'un fluide cryogénique à l'état liquide, diphasique ou supercritique et d'un conduit d'évacuation d'un fluide cryogénique à l'état vapeur, lesdits conduits étant reliés à un refroidisseur cryogénique, caractérisé en ce que le procédé de régulation met en oeuvre les étapes suivantes :

- Mesure d'une ou plusieurs grandeur(s) directement au niveau du bain cryogénique permettant de déduire la masse totale de fluide cryogénique au sein du bain cryogénique ;
- Asservissement de la masse totale de fluide cryogénique au sein du bain cryogénique à une masse de consigne, à partir de la mesure précédente.

[0010] L'étape d'asservissement peut comprendre les étapes suivantes :

- Transmission d'une ou plusieurs grandeur(s) directement mesurée(s) au niveau du bain cryogénique vers un dispositif de régulation ;
- Déduction de cette ou de ces grandeur(s) mesurée(s) de la masse totale de fluide cryogénique dans le bain cryogénique ;
- Comparaison de la masse totale de fluide du bain cryogénique avec la masse de consigne ;
- Calcul d'une commande d'actionnement du système de refroidissement à partir de cette comparaison ;
- Transmission d'une donnée correspondant à la commande d'actionnement vers au moins un actionneur afin d'agir sur un composant du système de refroidissement et modifier sa configuration, par exemple modifier un débit, notamment en agissant sur un actionneur associé à au moins une vanne.

[0011] L'étape de mesure d'une ou plusieurs grandeur(s) directement au niveau du bain cryogénique peut comprendre :

- une mesure par des capteurs du niveau de liquide présent dans le bain cryogénique et une mesure température ou de pression du bain cryogénique ; ou
- une mesure par un peson de la masse de tout ou partie du bain cryogénique.

[0012] Le procédé de régulation peut comprendre une étape de mesure par des capteurs du niveau de liquide et une mesure de température ou de pression du bain cryogénique et une étape de calcul par un premier module de traitement d'un dispositif de régulation de la masse totale de fluide dans le bain cryogénique à partir de la lecture dans une mémoire électronique de la masse volumique du liquide et du gaz cryogénique à saturation et du calcul du volume de liquide et de gaz présents dans le bain cryogénique.

[0013] Le procédé de régulation peut comprendre une étape de transmission d'une donnée correspondant à une commande d'actionnement vers au moins un actionneur associé à une vanne disposée sur le conduit d'amenée et/ou sur le conduit d'évacuation.

[0014] Le procédé de régulation peut comprendre une étape de modification de la configuration du système de refroidissement qui induit une variation de la pression et de la température du fluide cryogénique au sein du bain cryogénique, sur la courbe de saturation liquide-vapeur, par exemple en modifiant un débit au niveau du refroidisseur, notamment en agissant sur au moins une vanne, tout en conservant asservie la masse totale de fluide cryogénique présent dans le bain cryogénique.

[0015] L'invention porte aussi sur un système de refroidissement cryogénique d'une source thermique échangeant sa charge thermique avec un bain cryogénique pourvu d'un conduit d'amenée d'un fluide cryogénique à l'état liquide, diphasique ou supercritique et d'un conduit d'évacuation d'un fluide cryogénique à l'état vapeur, lesdits conduits étant reliés à un refroidisseur cryogénique, caractérisé en ce qu'il comprend un dispositif de mesure directe de la masse de fluide cryogénique présent dans le bain cryogénique et un dispositif de régulation qui met en oeuvre le procédé de régulation du système de refroidissement cryogénique tel que décrit précédemment pour un asservissement la masse totale de fluide cryogénique au sein du bain cryogénique à une masse de consigne.

[0016] Le système de refroidissement cryogénique peut comprendre :

- un capteur de mesure du niveau de liquide présent dans le bain cryogénique et un capteur de température ou de pression au sein du bain cryogénique ; ou
- un peson ou une balance permettant de mesurer tout ou partie de la masse du bain cryogénique,

et peut comprendre un dispositif de communication permettant de transmettre la ou les mesures effectuée(s) au dispositif de régulation.

[0017] Le système de refroidissement cryogénique peut comprendre une vanne disposée sur le conduit d'amenée et/ou sur le conduit d'évacuation et le dispositif de régulation peut être lié à un actionneur de ladite vanne par un dispositif de communication pour lui transmettre des commandes.

[0018] Le système de refroidissement cryogénique peut comprendre un échangeur thermique disposé au sein du bain cryogénique apte à une liaison thermique avec une source thermique pour évacuer de la chaleur provenant de la source thermique.

[0019] Ces objets, caractéristiques et avantages de la présente invention seront exposés en détail dans la description suivante d'un mode d'exécution particulier fait à titre non-limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

La figure 1 représente un diagramme temporel de la chaleur engendrée par une charge thermique pulsée (aimant supraconducteur d'un tokamak) selon l'état de la technique.

La figure 2 représente un schéma général d'un système de refroidissement cryogénique de l'état de la technique.

La figure 3 représente un schéma illustrant un procédé de régulation d'un système de refroidissement cryogénique selon le mode de réalisation de l'invention.

[0020] Sauf indication contraire, dans la suite de la description on entendra toujours par « débit » un débit massique.

[0021] La figure 3 représente schématiquement un système de refroidissement cryogénique selon un mode de réalisation de l'invention : un bain cryogénique 1 (ou réservoir) est pourvu d'un conduit d'amenée 10 d'un fluide cryogénique à l'état liquide, diphasique ou supercritique, et d'un conduit d'évacuation 11 d'un fluide cryogénique à l'état gazeux, lesdits conduits étant reliés à un refroidisseur cryogénique, non représenté, qui peut être tout refroidisseur de l'état de la technique tel que celui illustré par la figure 2. A titre d'exemple, le bain cryogénique 1 peut comprendre de l'hélium à la pression de 1 bar et à la température de 4,2 K, ce qui correspond à une condition de saturation et donc d'équilibre entre les phases liquide et gazeuse. De même, le système de refroidissement comprend un circuit fluide dit primaire, non représenté, et qui peut être similaire à celui représenté sur la figure 2, dans lequel circule un fluide caloporteur, comprenant un premier échangeur pour extraire de la chaleur d'une source thermique, et un deuxième échangeur disposé au sein du bain cryogénique pour céder ladite chaleur au bain cryogénique. En variante, la source thermique peut ne pas être déportée, et est, par exemple, noyée dans le bain cryogénique (cas des aimants d'un dispositif à Résonance Magnétique Nucléaire / RMN). Dans un tel cas, il n'y a ni circuit primaire, ni échangeur. Selon une autre variante, un seul échangeur est nécessaire. L'invention porte donc aussi sur un système de refroidissement adapté à ces variantes d'utilisation.

[0022] Le système de refroidissement comprend de plus un dispositif de mesure 13 de la masse totale de fluide présent dans le bain cryogénique 1. Selon le mode de réalisation représenté, le dispositif de mesure 13 de la masse comprend un capteur de température 14 et un dispositif de mesure de la hauteur de liquide 15 du bain cryogénique, cette hauteur s'entendant selon la direction verticale z. Le fluide présent dans le bain cryogénique se trouve dans des conditions de saturation, et est réparti en une masse liquide et une masse gazeuse en équilibre. Dans ces conditions, la masse volumique du liquide et du gaz à saturation ne dépend que de sa température, ou en variante que de sa pression, ces deux grandeurs de température et pression étant liées entre elles par une équation bijective.

[0023] Ainsi, en considérant un bain cryogénique 1 de section S constante, cette section étant définie par une coupe selon un plan horizontal perpendiculaire à la direction verticale z, la masse de liquide mliq contenue dans le bain cryogénique 1 s'exprime par l'équation suivante :

$$m_{liq} = \rho_{liq}(T) \cdot S \cdot h \quad (1)$$

où $\rho_{liq}(T)$ représente la masse volumique du liquide à la température de saturation T, et h la hauteur du liquide au sein du bain cryogénique 1.

[0024] De même la masse de gaz mgaz contenu dans le bain cryogénique 1 se calcule par :

$$m_{gaz} = \rho_{gaz}(T) \cdot S \cdot (H_{tot} - h) \quad (2)$$

avec $\rho_{gaz}(T)$ représente la masse volumique du gaz à la température de saturation T, et H_{tot} la hauteur totale du réservoir.

[0025] La masse totale M_{tot} (liquide + gaz) contenue à l'intérieur du réservoir formant le bain cryogénique 1 est donc égale à :

$$M_{tot} = \rho_{liq}(T) \cdot S \cdot h + \rho_{gaz}(T) \cdot S \cdot (H_{tot} - h) \quad (3)$$

[0026] Cette formule (3) montre que la mesure de la hauteur h de liquide et la mesure de la température T suffisent à en déduire directement à tout instant la masse totale de fluide dans le bain cryogénique 1.

[0027] Dans le cas général où la forme du réservoir est telle que sa section droite $S(h)$ est variable avec la hauteur h du réservoir, la formule (3) précédente devient :

$$M_{tot} = \rho_{liq}(T) \int_0^h S(h) dh + \rho_{gaz}(T) \int_h^{H_{tot}} S(h) dh \quad (3')$$

[0028] Selon une première variante de réalisation, le capteur de température 14 pourrait être remplacé par un capteur de pression P , et les formules (3) (3') modifiées en remplaçant la température T par la pression P .

[0029] Dans tous les cas, le dispositif de régulation 20 peut comprendre une mémoire électronique sur laquelle est mémorisée une table donnant les valeurs de ρ_{liq} et ρ_{gaz} en fonction de la température T et/ou de la pression P de saturation. Cette table peut ainsi être lue automatiquement par le logiciel de calcul dans la mise en oeuvre des calculs selon les équations précédentes.

[0030] Selon une seconde variante de réalisation, la masse totale de fluide présent dans le bain cryogénique 1 est mesurée par un peson. Pour s'affranchir des erreurs qui pourraient provenir de l'estimation du poids du réservoir à vide ainsi que des reprises partielles du poids via les tuyauteries, la mesure serait définie par une mesure indépendante. Associé par exemple à une lecture du niveau utilisée uniquement pour initialiser la masse à réguler, ce capteur permettrait de s'affranchir des éventuelles incertitudes ou erreurs de mesure de la méthode précédente, par exemple dans le cas d'absence d'interface liquide/vapeur ou dans le cas d'inhomogénéités du gaz et/ou du liquide (comme une présence de bulles dans le liquide). Le peson, ou toute balance, mesure tout ou partie de la masse du réservoir. La masse totale de fluide présent dans le bain cryogénique est déduite de cette mesure.

[0031] Dans toutes ces variantes de réalisation, une ou plusieurs mesures sont directement effectuées sur le bain cryogénique 1 lui-même, pour obtenir une ou plusieurs valeurs mesurées qui permettent le calcul direct de la masse totale de fluide présent au sein du bain cryogénique 1. Pour cette raison, nous considérons que le dispositif de mesure 13 de la masse est un dispositif de mesure directe de la masse totale réelle. Cela s'oppose aux solutions de l'état de la technique qui permettent d'estimer indirectement la masse de fluide présent au sein du bain cryogénique 1 à partir d'au moins une mesure effectuée à l'extérieur du bain cryogénique, par exemple par la différence de débit entre le conduit d'amenée 10 et le conduit d'évacuation 11.

[0032] Le système de refroidissement comprend de plus un dispositif de régulation 20 du système, notamment des débits fluidiques massiques du refroidisseur lié au bain cryogénique 1, qui met en oeuvre un procédé de régulation du système qui sera décrit ultérieurement. Pour cela, le dispositif de régulation 20 comprend une unité de gestion qui se présente sous la forme d'une entité de calcul, par exemple comprenant tout calculateur, tout élément à base de microprocesseur(s), avec un support logiciel et au moins une mémoire électronique, pour mettre en oeuvre les fonctionnalités qui vont être décrites ci-après du procédé de refroidissement. Cette unité de gestion peut être physiquement à proximité du système de refroidissement ou à distance. Elle peut se présenter sous la forme d'une seule entité physique ou de plusieurs entités. Elle comprend un premier dispositif de communication 21 pour recevoir des données provenant du dispositif de mesure 13 de la masse de fluide du bain cryogénique. Elle comprend un second dispositif de communication 22 pour transmettre des données de commande vers un ou plusieurs actionneur(s), ces derniers permettant de modifier la configuration du système de refroidissement pour réguler son fonctionnement. Dans le mode de réalisation choisi, le second dispositif de communication 22 est relié à un actionneur d'une vanne de détente 12 disposée sur le conduit d'amenée 10, pour modifier le débit d'entrée de fluide dans le bain cryogénique.

[0033] Le dispositif de régulation 20 met en oeuvre une régulation de la masse de fluide présente dans le bain cryogénique de sorte à la maintenir constante, ce qui garantit indirectement l'égalité des débits entrant et sortant du bain cryogénique et la stabilité à un point de fonctionnement optimum du système de refroidissement dans son ensemble. Pour cela, cette masse est asservie sur une masse de consigne, comme cela sera détaillé par la suite.

[0034] La figure 3 représente donc schématiquement la régulation mise en oeuvre par le dispositif de régulation 20. Ce dernier comprend un premier module 23 de traitement qui permet de traiter la ou les données de mesure provenant du dispositif de mesure 13 de la masse. Ce traitement consiste en un éventuel calcul selon l'une des formules (3) (3') mentionnées précédemment, ou une simple réception et mémorisation de la donnée transmise, de sorte à obtenir une

valeur de masse totale de fluide présent dans le bain cryogénique 1. La fonction de ce premier module 23 est de préférence mise en oeuvre par un logiciel sur une entité de calcul, comme mentionné précédemment. La valeur donnée en sortie par ce premier module 23 consiste donc en la masse totale de fluide présent dans le bain cryogénique, mesurée directement. Elle est utilisée comme entrée dans un second module 24 de comparaison, où elle est comparée à une

- Une valeur basse (masse minimale de liquide), par exemple définie pour permettre à un échangeur X2 d'être complètement mouillé et qui permet de stocker une énergie suffisante, et
- Une valeur haute (masse maximale de liquide) définie par une situation avec un volume plus important de liquide, sans provoquer un problème de gouttelettes dans le conduit d'évacuation.

[0035] La masse de consigne peut être calculée comme une valeur moyenne entre ces deux valeurs basse et haute. Ce calcul peut utiliser la température moyenne à maintenir et la connaissance des masses volumiques des phases en présence.

[0036] Le résultat de la comparaison mise en oeuvre par le second module 24 de comparaison est ensuite transmis à un troisième module 26 qui applique une loi de régulation à partir de ce résultat, pour transmettre en sortie une (ou plusieurs) donnée de commande vers la vanne 12 du système de refroidissement par le dispositif de communication 22. La loi de régulation est choisie parmi les solutions existantes de l'état de la technique afin d'obtenir un asservissement de la masse totale du bain cryogénique sur la masse de consigne. Comme cela apparaîtra par la suite, la performance de la régulation du système de refroidissement est fortement améliorée grâce à l'utilisation d'une mesure directe de la

[0037] En effet, le bain cryogénique 1 du système de refroidissement, diphasique liquide-vapeur, à saturation, fonctionne souvent à température constante dans l'état de la technique. Toutefois, la température du bain saturé peut augmenter si la pression dans le réservoir augmente, cette augmentation étant due par exemple à une augmentation de la perte de pression en aval du bain. Cette augmentation est même souhaitée lorsque l'on désire maintenir un débit de soutirage donné alors que le transfert de chaleur dans la source froide augmente du fait par exemple d'une hausse de l'énergie générée par la source à refroidir : dans ce cas, il est possible de maintenir une partie du liquide évaporé dans le bain cryogénique, par exemple en fermant un peu une vanne située en aval de celui-ci, par exemple sur le conduit de d'évacuation 11, ce qui a pour effet d'augmenter la pression et corrélativement la température du bain saturé. Cet effet est notamment recherché lorsque l'on désire utiliser cette source froide en volant thermique. Dans une situation où la température et la pression du fluide du bain cryogénique sont variables, ces deux valeurs se déplaçant le long de la courbe de saturation du fluide considéré, la hauteur du liquide du bain cryogénique ne correspond pas à une masse donnée puisque ledit liquide devient plus léger en chauffant. Ainsi, les nombreuses solutions de l'état de la technique qui ne reposent que sur la mesure de cette hauteur ne conviennent pas à une telle situation, au contraire de l'invention. De plus, les mesures de débits sont souvent très imprécises, ce qui est un inconvénient des nombreuses solutions de l'état de la technique basées sur une régulation du système de refroidissement utilisant un calcul de la variation de masse par différence entre le débit entrant et le débit sortant. En effet, une erreur systématique sur le calcul de la différence des débits (due à une erreur systématique de l'un et/ou de l'autre des deux débits mesurés) provoquera, avec le temps, une dérive constante de la valeur de la masse. L'invention présente aussi l'avantage de surmonter cet inconvénient, car la mesure de la masse proposée est beaucoup plus précise et surtout ne présente pas de dérive avec le temps.

[0038] Ainsi, le dispositif de régulation 20 du système de refroidissement met en oeuvre un procédé de régulation du système de refroidissement, qui comprend les étapes suivantes :

- Mesure d'une ou plusieurs grandeur(s) directement au niveau du bain cryogénique pour en déduire directement la masse totale de fluide présent au sein du bain cryogénique ;
- Asservissement de cette masse totale sur une valeur de masse de consigne.

[0039] L'asservissement comprend les étapes suivantes :

- Transmission d'une ou plusieurs grandeur(s) directement mesurée(s) au niveau du bain cryogénique vers un dispositif de régulation ;
- Déduction de cette ou ces grandeur(s) de la masse totale du bain cryogénique ;
- Comparaison de la masse totale de fluide du bain cryogénique avec une masse de consigne ;

- Calcul d'une commande d'actionnement du système de refroidissement ;
- Transmission d'une donnée correspondant à la commande d'actionnement vers un actionneur afin d'agir sur un composant du système de refroidissement et modifier sa configuration, par exemple modifier un débit, notamment en agissant sur au moins une vanne.

[0040] Ces étapes sont répétées périodiquement, pour obtenir un ajustement et une régulation du système de refroidissement en temps réel ou quasi-réel.

[0041] En remarque, l'asservissement peut être obtenu en agissant sur une ou plusieurs autres vannes, en remplacement ou complément de la vanne de détente 12 du conduit d'amenée 10, et/ou par un actionnement d'autres composants du système de refroidissement. Par exemple, une vanne additionnelle de détente et/ou un compresseur peut être placé(e) sur le conduit d'évacuation 11. Dans le cas où vanne et compresseur sont associés, ce dernier est placé en aval de la vanne pour réguler le débit. On peut aussi associer une vanne sur le conduit d'amenée à une vanne sur le conduit d'évacuation.

[0042] Le procédé peut aussi comprendre une étape de saisie ou de calcul automatique d'une donnée représentant une masse de consigne.

[0043] Le procédé peut aussi comprendre une étape de modification de la configuration du système de refroidissement, par exemple en modifiant un débit au niveau du refroidisseur, notamment en agissant sur au moins une vanne, de sorte à induire une variation de la pression et de la température du fluide cryogénique au sein du bain cryogénique, sur la courbe de saturation liquide-vapeur. Cette étape peut par exemple comprendre le maintien d'un débit de soutirage donné alors que le transfert de chaleur provenant de la source à refroidir augmente. Plus généralement, cela peut apparaître lors d'une variation de la chaleur provenant de la source chaude externe à refroidir.

Revendications

1. Procédé de régulation d'un système de refroidissement cryogénique comportant un bain cryogénique (1) pourvu d'un conduit d'amenée (10) d'un fluide cryogénique à l'état liquide, diphasique ou supercritique et d'un conduit d'évacuation (11) d'un fluide cryogénique à l'état vapeur, lesdits conduits étant reliés à un refroidisseur cryogénique, **caractérisé en ce que** le procédé de régulation met en oeuvre les étapes suivantes :

- Mesure d'une ou plusieurs grandeur(s) directement au niveau du bain cryogénique permettant de déduire la masse totale de fluide cryogénique au sein du bain cryogénique ;
- Asservissement de la masse totale de fluide cryogénique au sein du bain cryogénique à une masse de consigne, à partir de la mesure précédente, cette étape d'asservissement comprenant les étapes suivantes :

- Transmission d'une ou plusieurs grandeur(s) directement mesurée(s) au niveau du bain cryogénique vers un dispositif de régulation (20) ;
- Déduction de cette ou de ces grandeur(s) mesurée(s) de la masse totale de fluide cryogénique dans le bain cryogénique (1) ;
- Comparaison de la masse totale de fluide du bain cryogénique avec la masse de consigne ;
- Calcul d'une commande d'actionnement du système de refroidissement à partir de cette comparaison ;
- Transmission d'une donnée correspondant à la commande d'actionnement vers au moins un actionneur afin d'agir sur un composant du système de refroidissement et modifier sa configuration, par exemple modifier un débit, notamment en agissant sur un actionneur associé à au moins une vanne.

2. Procédé de régulation d'un système de refroidissement cryogénique selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** l'étape de mesure d'une ou plusieurs grandeur(s) directement au niveau du bain cryogénique comprend une mesure par des capteurs du niveau de liquide présent dans le bain cryogénique (1) et une mesure de température du bain cryogénique.

3. Procédé de régulation d'un système de refroidissement cryogénique selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'étape de mesure d'une ou plusieurs grandeur(s) directement au niveau du bain cryogénique comprend :

- une mesure par des capteurs du niveau de liquide présent dans le bain cryogénique (1) et une mesure de pression du bain cryogénique ; ou
- une mesure par un peson de la masse de tout ou partie du bain cryogénique (1).

4. Procédé de régulation d'un système de refroidissement cryogénique selon la revendication 2 ou 3, **caractérisé en ce qu'il** comprend une étape de mesure par des capteurs du niveau de liquide et une mesure de température ou de pression du bain cryogénique (1) et une étape de calcul par un premier module (23) de traitement d'un dispositif de régulation (20) de la masse totale de fluide dans le bain cryogénique à partir de la lecture dans une mémoire électronique de la masse volumique du liquide et du gaz cryogénique à saturation et du calcul du volume de liquide et de gaz présents dans le bain cryogénique.
5. Procédé de régulation d'un système de refroidissement cryogénique selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** comprend une étape de transmission d'une donnée correspondant à une commande d'actionnement vers au moins un actionneur associé à une vanne (12) disposée sur le conduit d'amenée (10) et/ou sur le conduit d'évacuation (11).
6. Procédé de régulation d'un système de refroidissement cryogénique selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** comprend une étape de modification de la configuration du système de refroidissement qui induit une variation de la pression et de la température du fluide cryogénique au sein du bain cryogénique (1), sur la courbe de saturation liquide-vapeur, par exemple en modifiant un débit au niveau du refroidisseur, notamment en agissant sur au moins une vanne, tout en conservant asservie la masse totale de fluide cryogénique présent dans le bain cryogénique (1).
7. Système de refroidissement cryogénique d'une source thermique échangeant sa charge thermique avec un bain cryogénique (1) pourvu d'un conduit d'amenée (10) d'un fluide cryogénique à l'état liquide, diphasique ou supercritique et d'un conduit d'évacuation (11) d'un fluide cryogénique à l'état vapeur, lesdits conduits étant reliés à un refroidisseur cryogénique, **caractérisé en ce qu'il** comprend un dispositif de mesure (13) directe de la masse de fluide cryogénique présent dans le bain cryogénique (1) et un dispositif de régulation (20) qui met en oeuvre le procédé de régulation du système de refroidissement cryogénique selon l'une des revendications précédentes pour un asservissement la masse totale de fluide cryogénique au sein du bain cryogénique à une masse de consigne.
8. Système de refroidissement cryogénique selon la revendication précédente, **caractérisé en ce qu'il** comprend :
- un capteur de mesure (15) du niveau de liquide présent dans le bain cryogénique (1) et un capteur de température (14) ou de pression au sein du bain cryogénique ; ou
 - un peson ou une balance permettant de mesurer tout ou partie de la masse du bain cryogénique (1),
- et **en ce qu'il** comprend un dispositif de communication (21) permettant de transmettre la ou les mesures effectuée(s) au dispositif de régulation (20).
9. Système de refroidissement cryogénique selon la revendication 7 ou 8, **caractérisé en ce qu'il** comprend une vanne (12) disposée sur le conduit d'amenée (10) et/ou sur le conduit d'évacuation (11) et **en ce que** le dispositif de régulation (20) est lié à un actionneur de ladite vanne (12) par un dispositif de communication (22) pour lui transmettre des commandes.
10. Système de refroidissement cryogénique selon l'une des revendications 7 à 9, **caractérisé en ce qu'il** comprend un échangeur thermique disposé au sein du bain cryogénique (1) apte à une liaison thermique avec une source thermique pour évacuer de la chaleur provenant de la source thermique.

Fig.1

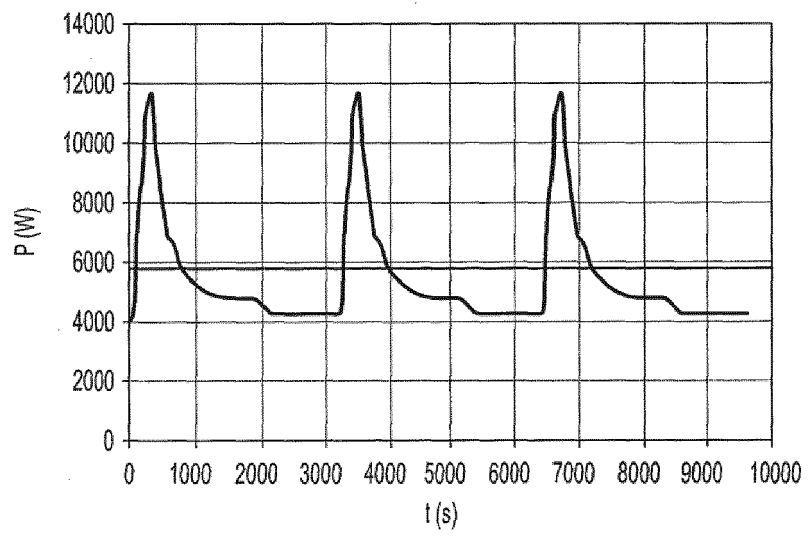
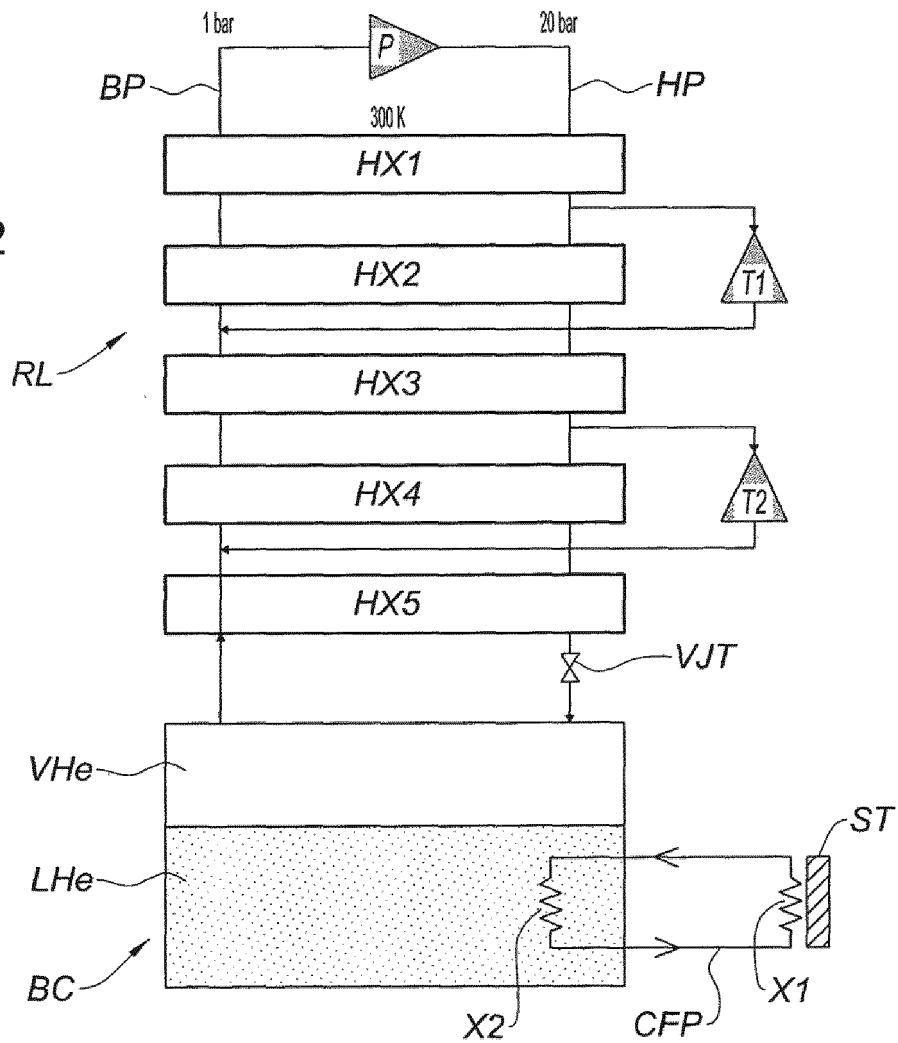
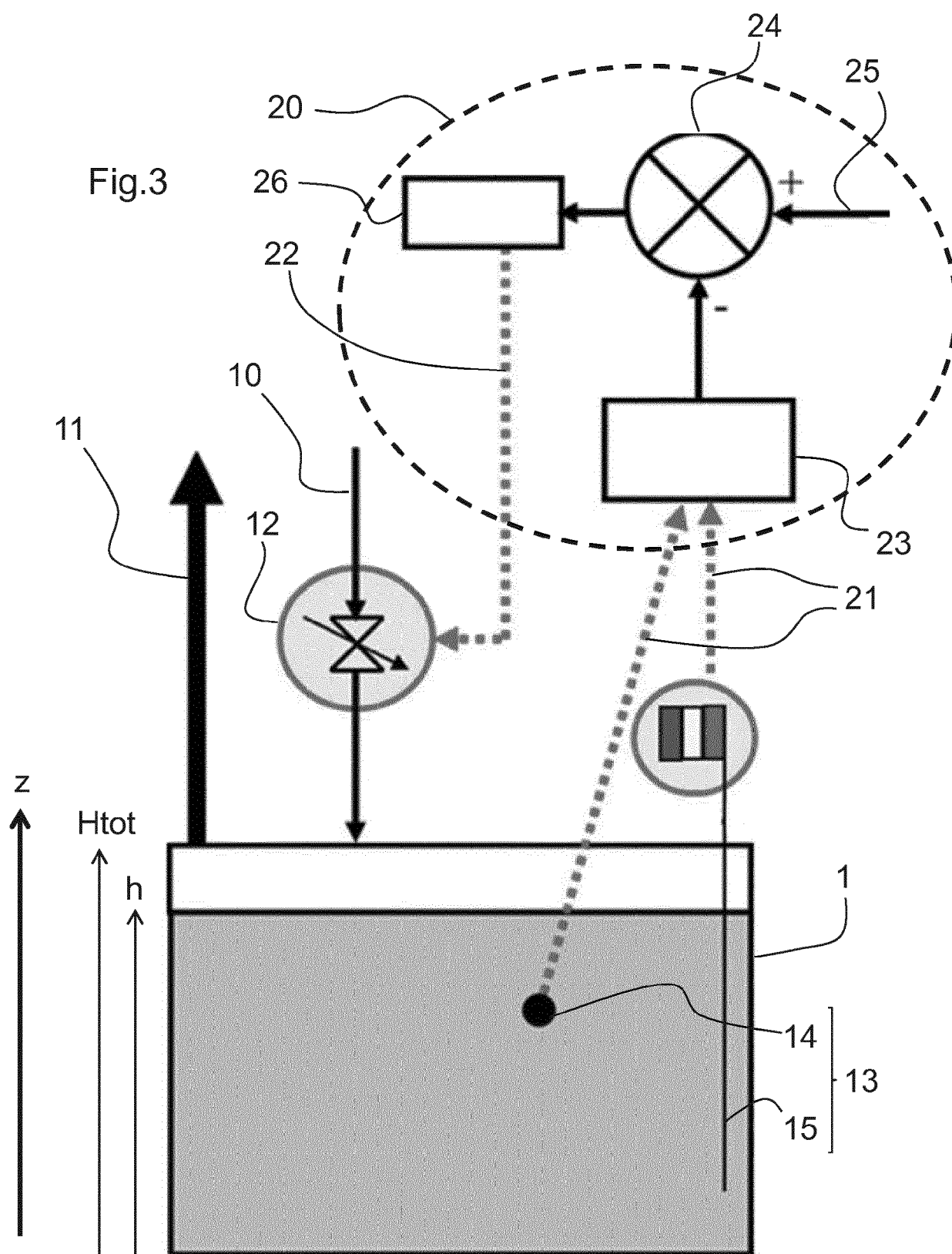


Fig.2







RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 16 19 3760

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)
A	WO 2013/088303 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 20 juin 2013 (2013-06-20) * le document en entier * -----	1-10	INV. F25B9/00 F17C13/02 F25D29/00
A	FR 2 924 788 A1 (AIR LIQUIDE [FR]) 12 juin 2009 (2009-06-12) * le document en entier * -----	1-10	
A	DE 41 07 320 A1 (SITTE HELLMUTH [AT]) 10 septembre 1992 (1992-09-10) * le document en entier * -----	1-10	
A	US 2014/214217 A1 (BONNE FRANCOIS [FR] ET AL) 31 juillet 2014 (2014-07-31) * le document en entier * -----	1-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			F25B F17C F25D
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 7 mars 2017	Examineur Lucic, Anita
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 16 19 3760

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.

07-03-2017

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2013088303 A1	20-06-2013	EP 2791595 A1 FR 2983947 A1 WO 2013088303 A1	22-10-2014 14-06-2013 20-06-2013
FR 2924788 A1	12-06-2009	FR 2924788 A1 WO 2009074757 A1	12-06-2009 18-06-2009
DE 4107320 A1	10-09-1992	AT 405322 B DE 4107320 A1	26-07-1999 10-09-1992
US 2014214217 A1	31-07-2014	EP 2759784 A1 FR 3001533 A1 US 2014214217 A1	30-07-2014 01-08-2014 31-07-2014

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

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- WO 2013088303 A [0005] [0006]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **J.-C. BOISSIN et al.** Cryogénie : mise en oeuvre des basses températures. *Techniques de l'Ingénieur*, vol. 2, 382 [0004]