

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
—
COURBEVOIE
—

①1 N° de publication : **3 141 451**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)
②1 N° d'enregistrement national : **22 11414**
⑤1 Int Cl⁸ : **B 65 D 90/30** (2023.01), F 17 C 1/12, F 17 C 13/00

①2

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 Procédé de contrôle de la pression intérieure d'un réservoir cryogénique.

②2 Date de dépôt : 02.11.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public
de la demande : 03.05.24 Bulletin 24/18.

④5 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 31.01.25 Bulletin 25/05.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *Fives Cryomec AG Société
Anonyme* — CH.

⑦2 Inventeur(s) : GEBEL Félicien et DUVIVIER Pierre-
Yves.

⑦3 Titulaire(s) : *Fives Cryomec AG Société Anonyme.*

⑦4 Mandataire(s) : IP TRUST.

FR 3 141 451 - B1



Description

Titre de l'invention : Procédé de contrôle de la pression intérieure d'un réservoir cryogénique

Domaine technique de l'invention

- [0001] L'invention appartient au domaine technique des réservoirs cryogéniques. L'invention concerne plus précisément un procédé de contrôle de la pression intérieure d'un réservoir cryogénique. L'invention concerne par ailleurs une installation de stockage d'un fluide cryogénique.
- [0002] Par réservoir cryogénique, on entend tout réservoir apte et conçu pour stocker des gaz sous une forme liquéfiée.
- [0003] Par fluide cryogénique, on entend tout fluide qui a été refroidi à une température inférieure à son point d'ébullition.

Arrière-plan technique

- [0004] L'invention s'applique tout particulièrement à des réservoirs cryogéniques aptes à stocker un fluide cryogénique à une pression inférieure à 20 bar. La pression indiquée ici et les pressions indiquées par la suite sont en bars absolus.
- [0005] De tels réservoirs sont couramment utilisés pour stocker le fluide cryogénique, qui, à la pression atmosphérique, est liquide à une température inférieure à 273,15 K, en particulier inférieure à 213,15 K. Classiquement, ces réservoirs appartiennent à une installation de stockage.
- [0006] Ces installations de stockage sont généralement configurées pour, d'une part, permettre la distribution du fluide à un ou plusieurs éléments demandeurs, et d'autre part, être approvisionnées en fluide depuis un ou plusieurs éléments extérieurs d'approvisionnement.
- [0007] Par exemple, comme éléments demandeurs, on peut citer des éléments aptes à recevoir du fluide depuis un réservoir. Par exemple, ces éléments peuvent être des véhicules configurés pour recevoir et stocker du fluide.
- [0008] Par exemple, comme éléments extérieurs d'approvisionnement, on peut citer des éléments aptes à fournir à un réservoir une quantité de fluide sous forme liquide ou gazeuse.
- [0009] Dans de telles installations de stockage, le fluide cryogénique est initialement stocké à l'état liquide mais développe inévitablement des gaz d'évaporation de sorte à former, dans le réservoir, à la fois une fraction liquide au fond du réservoir et une fraction gazeuse au sommet du réservoir. Une partie de cette fraction gazeuse issue des gaz d'évaporation est habituellement évacuée à l'atmosphère sans être utilisée. Classiquement, cette évacuation est rendue possible par un organe de protection que

comprend le réservoir tel qu'une soupape et/ou un disque de rupture permettant une libération d'une partie au moins de la fraction gazeuse vers l'extérieur en cas de pression excédant une limite dans le réservoir. Cette limite est typiquement la pression maximale admissible du réservoir, limite habituellement donnée par le constructeur.

[0010] Toutefois, les gaz d'évaporation libérés à l'atmosphère constituent un inconvénient à la fois écologique et économique.

[0011] C'est pourquoi, divers systèmes et procédés de gestion de la pression intérieure d'un réservoir ont été envisagés pour éviter l'évacuation de ces gaz d'évaporation vers l'extérieur. Ces systèmes et procédés consistent, soit à consommer une portion de la fraction liquide contenue dans le réservoir de sorte à abaisser régulièrement la pression intérieure du réservoir, soit à extraire du réservoir une partie de la fraction gazeuse et à la recomprimer via un système complexe et onéreux de compression gazeuse.

[0012] Cependant, pour des raisons écologiques et économiques évidentes, de telles solutions ne peuvent être envisagées pour des applications commerciales à des installations de stockage.

[0013] Un but de la présente invention est donc de pallier tout ou partie des inconvénients relevés ci-dessus.

Résumé de l'invention

[0014] A cette fin, l'invention propose un procédé simple, dont sa mise en œuvre est peu onéreuse, qui permet de contrôler la pression intérieure d'un réservoir cryogénique de sorte à éviter qu'une partie au moins de la fraction gazeuse ne soit évacuée hors du réservoir cryogénique en raison d'une élévation trop importante de sa pression intérieure.

[0015] A cet effet, il est proposé en premier lieu un procédé de contrôle de la pression intérieure d'un réservoir cryogénique contenant une fraction liquide et une fraction gazeuse d'un fluide dont l'enthalpie peut baisser lors d'une compression isothermique en phase liquide, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- prélèvement d'une portion de la fraction liquide pour obtenir une portion prélevée définie à un état A par :

- une première température T1,
 - une première pression P1,
 - une première enthalpie E1, et
 - une première densité D1,
- compression sensiblement isothermique de la portion prélevée pour obtenir une portion comprimée définie à un état B par :

- une deuxième température T2 sensiblement égale à la première température T1,
- une deuxième pression P2 supérieure à la première pression P1, et

- une deuxième densité D2 supérieure à la première densité D1, ladite compression étant apte à conduire à une diminution d'enthalpies entre la première enthalpie E1 de l'état A et une deuxième enthalpie E2 de l'état B,
- détente de la portion comprimée pour obtenir une portion détendue définie à un état C par :
 - une troisième température T3 inférieure à la deuxième température T2,
 - une troisième pression P3 inférieure à la deuxième pression P2, et
 - une troisième densité D3 inférieure à la deuxième densité D2 et supérieure à la première densité D1,
- injection de la portion comprimée ou de la portion détendue dans le réservoir de stockage, ladite détente étant réalisée pendant ou après l'étape d'injection lorsque la portion comprimée est injectée dans le réservoir, ou ladite détente étant réalisée entre l'étape de compression et l'étape d'injection lorsque la portion détendue est injectée dans le réservoir.

[0016] Le procédé selon l'invention permet de s'opposer à une augmentation de la pression intérieure du réservoir cryogénique causée naturellement par son environnement ambiant. Ainsi, une évacuation hors du réservoir d'une partie de la fraction gazeuse, par exemple par l'actionnement d'une soupape de sécurité ou au travers des parois du réservoir cryogénique, est évitée.

[0017] Diverses caractéristiques supplémentaires peuvent être prévues seules ou en combinaison :

- l'étape de compression conduit à une baisse continue de l'enthalpie de la portion prélevée depuis l'état A jusqu'à l'état B,
- l'étape de compression est arrêtée lorsque la baisse d'enthalpie de la portion comprimée est inférieure à 0,1 kJ/kg pour une hausse de pression de 1 bar,
- le fluide est de l'hydrogène,
- la troisième pression P3 est supérieure ou sensiblement égale à la première pression P1,
- la détente est une détente sensiblement isenthalpique lorsque celle-ci est réalisée entre l'étape de compression et l'étape d'injection.

[0018] Il est proposé en deuxième lieu une installation de stockage d'une fraction liquide et d'une fraction gazeuse d'un fluide susceptible de mettre en œuvre le procédé ci-avant décrit, l'installation comprenant :

- un réservoir cryogénique destiné à contenir le fluide,
- un moyen de prélèvement d'une portion de la fraction liquide,
- un moyen compresseur apte à réaliser une compression sensiblement isothermique de la portion prélevée pour obtenir une portion comprimée,

- un moyen détenteur apte à réaliser une détente de la portion comprimée pour obtenir une portion détendue, et
 - un moyen injecteur apte à injecter dans le réservoir cryogénique la portion comprimée ou la portion détendue,
- installation dans laquelle le moyen détenteur et le réservoir sont, soit confondus, soit distincts.

[0019] L'installation selon l'invention présente l'avantage d'être compacte et facile à mettre en œuvre. En outre, cette installation est composée uniquement d'éléments simples et économiques.

[0020] Diverses caractéristiques supplémentaires peuvent être prévues seules ou en combinaison :

- l'installation comprend en outre un réservoir tampon disposé entre le moyen compresseur et le moyen détenteur,
- le moyen détenteur comprend une vanne de laminage.

[0021] L'invention peut concerner également tout procédé ou dispositif alternatif comprenant toute combinaison des caractéristiques ci-dessus ou ci-dessous.

Brève description des figures

[0022] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront au cours de la lecture de la description détaillée qui va suivre pour la compréhension de laquelle on se reportera aux dessins annexés dans lesquels :

[0023] [Fig.1] La [Fig.1] est une représentation schématique d'une installation de stockage selon un premier exemple de réalisation de l'invention.

[0024] [Fig.2] La [Fig.2] est une représentation schématique d'une installation de stockage selon un deuxième exemple de réalisation de l'invention.

[0025] [Fig.3] La [Fig.3] est une représentation schématique d'une installation de stockage selon un troisième exemple de réalisation de l'invention.

[0026] [Fig.4] La [Fig.4] est un diagramme montrant l'évolution de l'enthalpie (en kJ/kg) en fonction de la pression (en bar) d'une partie d'une fraction liquide d'hydrogène extraite d'un réservoir d'une installation de stockage selon l'invention.

[0027] [Fig.5] La [Fig.5] est un diagramme montrant l'évolution du coefficient de Joule-Thomson (en K/bar) en fonction de la température (en K) pour différentes pressions d'une partie d'une fraction liquide d'hydrogène extraite d'un réservoir d'une installation de stockage selon l'invention.

Description détaillée de l'invention

[0028] Dans la description qui va suivre, des éléments identiques, similaires ou analogues seront désignés par les mêmes références alphanumériques.

[0029] L'installation de stockage des exemples de réalisation de l'invention ci-après décrit

comprend un réservoir 100 de stockage de fluide et notamment d'un mélange diphasique de liquide et de gaz.

- [0030] Le réservoir 100 est un réservoir cryogénique.
- [0031] Le fluide est un fluide cryogénique.
- [0032] Le réservoir 100 contient le fluide sous une pression de stockage supérieure à la pression atmosphérique, par exemple sous une pression inférieure à 20 bar, de préférence inférieure à 12 bar. Le réservoir 100 est de préférence configuré pour stocker un volume de fluide allant jusqu'à 50 000 L à une température d'équilibre comprise entre 3,15 K et 213,15 K, de préférence comprise entre 18,15 K et 73,15 K.
- [0033] Le fluide adapté à être stocké dans le réservoir 100 est un fluide dont l'enthalpie peut baisser lors d'une compression isothermique en phase liquide. Par exemple, le fluide peut être de l'hélium ou de l'hydrogène. Le fluide adapté peut être défini par une courbe enthalpique à température constante du fluide liquide qui présente une forme sensiblement parabolique avec un point d'inflexion. Le point d'inflexion est atteint lorsque le coefficient de Joule-Thomson caractéristique de la phase liquide du fluide est égal à zéro. Il est à noter que le point d'inflexion de la courbe enthalpique varie avec la température.
- [0034] Avantagement, le fluide est de l'hydrogène. Il est à noter que la température de l'hydrogène liquide est inférieure à 33,15 K à pression atmosphérique.
- [0035] Par hydrogène, au sens de la présente invention, on entend un para hydrogène, un ortho hydrogène ou un mélange des deux.
- [0036] Le réservoir 100 est de préférence à double enveloppe, comprenant une première enveloppe interne destinée à contenir le fluide. De cette façon, le réservoir 100 présente une isolation thermique optimisée pour minimiser les échanges thermiques entre l'extérieur du réservoir 100 et le fluide.
- [0037] La première enveloppe est de préférence entourée d'une seconde enveloppe et le réservoir 100 comprend une isolation thermique dans l'espacement entre les deux enveloppes (notamment un espace sous vide).
- [0038] Le fluide contenu dans la première enveloppe du réservoir 100 forme une fraction liquide 1002 en partie inférieure, c'est-à-dire au fond du réservoir 100, et une fraction gazeuse 1004 en partie supérieure, c'est-à-dire au sommet du réservoir 100, séparés par une surface supérieure de la fraction liquide 1002.
- [0039] Classiquement, le réservoir 100 peut comprendre un organe de protection tel qu'une soupape et/ou un disque de rupture permettant une libération de fluide vers l'extérieur en cas de pression excédant une limite dans la première enveloppe. Cette limite est typiquement la pression maximale admissible du réservoir 100 (donnée par le constructeur). Cependant, l'invention a pour but d'éviter l'actionnement de cet organe de protection, celui-ci étant présent uniquement en cas d'extrême urgence, en par-

ticulier si le procédé selon l'invention dysfonctionne.

- [0040] De préférence, le réservoir 100 comprend en outre un ou plusieurs moyens de mesure d'un paramètre représentatif de la pression du fluide à l'intérieure de la première enveloppe du réservoir 100. Par exemple, comme moyen de mesure, on peut citer un manomètre, un capteur de pression électronique ou tout autre moyen de mesure d'un paramètre représentatif de la pression d'un fluide connu de l'homme du métier.
- [0041] Ce réservoir 100 est en outre adapté pour alimenter un ou plusieurs éléments demandeurs en liquide de préférence issu d'une partie de la fraction liquide 1002 extrait du fond du réservoir 100 (éléments demandeurs non représentés sur les figures).
- [0042] Le réservoir 100 peut donc comporter en outre une conduite d'alimentation agencée pour fournir en aval à au moins un élément demandeur une partie au moins de la fraction liquide 1002 contenue dans le réservoir 100.
- [0043] La conduite d'alimentation peut comporter un vaporiseur, ou réchauffeur, et au moins une vanne pour fournir en aval du gaz vaporisé plutôt que directement la partie au moins de la fraction liquide 1002 extraite. Ce réchauffeur peut être un échangeur thermique servant à transformer la partie au moins de la fraction liquide 1002 puisée dans le réservoir 100 en gaz par échange avec l'atmosphère ambient.
- [0044] Ce réservoir 100 est également classiquement adapté pour être approvisionné en fluide depuis un ou plusieurs éléments extérieurs d'approvisionnement (éléments extérieurs d'approvisionnement non représentés sur les figures).
- [0045] Le réservoir 100 peut donc comprendre en outre un circuit d'approvisionnement de la première enveloppe (circuit d'approvisionnement non représenté sur les figures).
- [0046] Par exemple, ce circuit d'approvisionnement comprend une première conduite d'approvisionnement ayant une extrémité amont destinée à être reliée à une première source de fluide (tel qu'un flexible d'un conteneur transporté par un camion par exemple) et une extrémité aval reliée à la partie inférieure de la première enveloppe du réservoir 100.
- [0047] Le circuit d'approvisionnement peut comprendre une deuxième conduite d'approvisionnement ayant une extrémité amont destinée à être reliée à une deuxième source de fluide et une extrémité aval reliée à la partie supérieure de la première enveloppe du réservoir 100.
- [0048] Les extrémités amonts des première et deuxième conduites d'approvisionnement peuvent être configurées pour être raccordées simultanément à la même source de fluide, par exemple au niveau d'une entrée ou bride commune. Dans ce cas, la première et deuxième sources de fluide sont confondues.
- [0049] Les extrémités amonts des première et deuxième conduites d'approvisionnement peuvent également chacune être configurée pour être raccordée simultanément à des sources de fluides différentes. Dans ce cas, la première et deuxième sources de fluide

sont distinctes.

- [0050] Le circuit d’approvisionnement peut comporter un ensemble de vanne (s) de répartition configuré pour permettre une répartition du fluide provenant de la source ou des sources de fluide dans l’une ou l’autre des première ou deuxième conduites d’approvisionnement.
- [0051] Il est à noter que, lors de l’approvisionnement du réservoir 100, tout apport de chaleur dans le réservoir 100 provoquera une vaporisation partielle de la fraction liquide 1002 du fluide, ce qui a pour conséquence d’augmenter le volume de la fraction gazeuse 1004.
- [0052] L’installation de stockage comprend en outre un moyen de prélèvement 1006 d’une portion de la fraction liquide 1002 qui est au moins en partie connecté au réservoir 100 afin d’obtenir une portion de la fraction liquide. Le moyen de prélèvement 1006 est apte et configuré pour s’assurer que l’extraction d’une portion de la fraction liquide 1002 est toujours effective quel que soit le niveau de la fraction liquide 1002 dans le réservoir 100. À cette fin, le moyen de prélèvement 1006 comporte une conduite d’extraction Cext ayant une extrémité amont reliée à la première enveloppe, en particulier à sa partie inférieure, et configurée pour permettre l’extraction d’une portion de la fraction liquide 1002 contenue dans la première enveloppe vers l’extérieur du réservoir 100, en particulier vers d’autres éléments de l’installation de stockage, dès que la pression intérieure du réservoir atteint une valeur prédéterminée. Par exemple, le moyen de prélèvement 1006 peut à cet effet en outre comprendre une vanne pilotée pour permettre d’activer ou non l’extraction en fonction de la pression intérieure du réservoir 100.
- [0053] De préférence, l’installation de stockage comprend également des éléments de mesure de la température et de la pression de la portion de la fraction liquide extraite. Par exemple, ces éléments de mesure peuvent être des capteurs connus de l’art antérieur.
- [0054] L’installation de stockage comprend en outre un moyen compresseur 120.
- [0055] Selon un mode de réalisation, le moyen compresseur est apte à réaliser une compression sensiblement isothermique de la portion de la fraction liquide 1002 extraite du réservoir 100 par le moyen de prélèvement 1006, en particulier extraite par la conduite d’extraction Cext.
- [0056] Selon un autre mode de réalisation, le moyen compresseur 120 peut-être associé à un élément extérieur, cette association permettant au moyen compresseur 120 de réaliser une compression sensiblement isothermique de la portion de la fraction liquide 1002 extraite du réservoir 100 par le moyen de prélèvement 1006, en particulier extraite par la conduite d’extraction Cext. Par exemple, comme élément extérieur, on peut citer un groupe de réfrigération.

- [0057] Le moyen compresseur 120, éventuellement associé à l'élément extérieur, permet d'obtenir en aval une portion comprimée. Le moyen compresseur 120, éventuellement associé à l'élément extérieur, est, de préférence, configuré pour comprimer la portion de la fraction liquide extraite à une pression comprise entre 6 et 100 bar, de préférence entre 6 et 70 bar lorsque le fluide est de l'hydrogène, et à une température comprise entre 18,15 K à 43,15 K, de préférence entre 28,15 K et 33,15 K lorsque le fluide est de l'hydrogène. Par exemple, le moyen compresseur 120 peut être du type à piston, à engrenage, à lobes, centrifuge ou toute autre technologie appropriée.
- [0058] Il est à noter que le moyen compresseur 120, éventuellement associé à l'élément extérieur, peut comprendre une enveloppe (ou chemise) disposée sur sa périphérie et à l'intérieur de laquelle circule une partie de la portion de la fraction liquide 1002 extraite. Ainsi, la partie de la portion de la fraction liquide 1002 provenant directement du réservoir 100 et circulant dans l'enveloppe est définie par une température inférieure à celle de la fraction liquide en cours de compression. Par exemple, 20% à 30% de la fraction liquide extraite circule dans l'enveloppe. De préférence, après que la partie de la portion de la fraction liquide extraite a circulé dans l'enveloppe, celle-ci est réintroduite dans le réservoir 100 au niveau de sa partie basse.
- [0059] Par ailleurs, l'installation de stockage peut comprendre en outre un dispositif supplémentaire (dispositif supplémentaire non représenté sur les figures) connu de l'homme du métier, et agencé en amont du moyen compresseur 120, éventuellement associé à l'élément extérieur, configuré pour refroidir la portion de la fraction liquide extraite à comprimer. Ce dispositif supplémentaire peut faire partie intégrante du moyen compresseur 120. Par exemple, ce dispositif supplémentaire peut être un deuxième groupe de réfrigération.
- [0060] Dans un premier exemple de réalisation (exemple de réalisation représenté sur la [Fig.1]), le moyen compresseur 120 est relié en aval par une canalisation C11 à un moyen injecteur 1008 que comprend l'installation de stockage. Le moyen injecteur 1008 est apte à injecter dans le réservoir 100 la portion comprimée sortant du moyen compresseur 120.
- [0061] Dans ce premier exemple de réalisation, le moyen compresseur 120, éventuellement associé à l'élément extérieur, est apte et configuré pour réaliser une compression sensiblement isothermique et pour fournir une portion comprimée définie par une pression prédéterminée, par exemple comprise entre 6 et 100 bar, de préférence entre 6 et 70 bar, lorsque le fluide est de l'hydrogène et à une température comprise entre 18,15 K à 43,15 K, de préférence entre 28,15 K et 33,15 K lorsque le fluide est de l'hydrogène. Par exemple, comme moyen compresseur 120 adapté à ce premier exemple de réalisation, on peut citer des pistons, des pompes à engrenages ou encore des pompes à lobes.

- [0062] L'utilisation d'un tel moyen compresseur 120 présente l'avantage d'éviter une détente de la portion comprimée avant que celle-ci ne soit injectée dans le réservoir 100. En effet, dans ce premier exemple de réalisation, le réservoir 100 se comporte comme un moyen détenteur. Le réservoir est alors configuré pour détendre la partie comprimée injectée dans le réservoir 100 par le moyen injecteur 1008. Cela est rendu possible car dans ce cas, la différence de pression entre la portion comprimée issue du moyen compresseur 120 et la pression intérieure du réservoir 100 n'excède pas 70 bar. Cela est également rendu possible car dans ce cas, la température de la portion comprimée issue du moyen compresseur 120 et la température intérieure du réservoir 100 sont sensiblement égales.
- [0063] Dans un deuxième exemple de réalisation (exemple de réalisation représenté sur la [Fig.2]), le moyen compresseur 120 est relié à un moyen détenteur 160 par une canalisation C12, le moyen détenteur 160 étant lui-même relié au moyen injecteur 1008 par une autre canalisation C22. Autrement dit, le moyen détenteur 160 est relié en amont au moyen compresseur 120 et relié en aval au moyen injecteur 1008. L'association du moyen compresseur 120 et du moyen détenteur 160 permet notamment de contrôler, ou d'ajuster, la pression de la portion comprimée obtenue en sortie du moyen compresseur 120. Le moyen compresseur 120, éventuellement associé à l'élément extérieur, est apte et configuré pour réaliser une compression sensiblement isothermique et pour fournir une portion comprimée définie par une pression prédéterminée, par exemple comprise entre 6 et 100 bar, de préférence comprise entre 6 et 70 bar lorsque le fluide est de l'hydrogène, et à une température comprise entre 18,15 K à 43,15 K, de préférence entre 28,15 K et 33,15 K lorsque le fluide est de l'hydrogène. Le moyen détenteur est apte et configuré pour réaliser une détente de préférence isenthalpique de la portion comprimée et pour fournir une portion détendue définie par une pression prédéterminée, par exemple inférieure à 20 bar, de préférence inférieure à 12 bar lorsque le fluide est de l'hydrogène. Par ailleurs, le moyen détenteur 160 est configuré pour réaliser une détente de préférence isenthalpique à une température comprise entre 3,15 K et 213,15 K, de préférence comprise entre 18,15 K et 73,15 K lorsque le fluide est de l'hydrogène. À cette fin, le moyen détenteur 160 comporte une vanne. Par exemple, la vanne peut être une vanne à disque ou à orifice poreux.
- [0064] Avantageusement, le moyen détenteur 160 comprend une vanne de laminage 162. Cette vanne de laminage 162 permet de réguler avec précision la pression de la portion comprimée, puis d'ajuster la pression de la portion comprimée puis détendue.
- [0065] Dans ce deuxième exemple de réalisation, la différence de pression entre la portion comprimée issue du moyen compresseur 120 et la portion détendue issue du moyen détenteur 160 est de préférence comprise entre 6 et 70 bar. En outre, la température de

la portion comprimée issue du moyen compresseur 120 est supérieure à la portion détendue.

[0066] Dans ce deuxième exemple de réalisation, le moyen injecteur 1008 est alors configuré pour injecter dans le réservoir 100 la portion détendue qui a été au préalable comprimée.

[0067] Dans un troisième exemple de réalisation (exemple de réalisation illustré sur la [Fig.3]), l'installation de stockage comprend notamment le moyen compresseur 120, le moyen détendeur 160 et le moyen injecteur 1008 du deuxième exemple de réalisation et comprend en outre un réservoir tampon 140 en amont duquel est relié le moyen compresseur 120 par une première conduite de transfert C13.

[0068] Le réservoir tampon 140 est en aval relié, par une deuxième conduite de transfert C23, au moyen détendeur 160. Le réservoir tampon 140 est donc en particulier disposé entre le moyen compresseur 120 et le moyen détendeur 160.

[0069] Ce réservoir tampon 140 permet d'emmagasiner plusieurs volumes de portions comprimées avant de réaliser une détente globale dans le moyen détendeur 160 de ces plusieurs volumes de portions comprimées. À cette fin, le réservoir tampon 140 est configuré pour permettre le passage du volume qu'il contient vers le moyen détendeur 160 une fois que sa pression intérieure a atteint une valeur prédéterminée, par exemple comprise entre 6 et 70 bar.

[0070] Le moyen injecteur 1008 est relié au moyen détendeur 160 par une troisième conduite de transfert C33. Le moyen injecteur 1008 est apte à injecter dans le réservoir 100 la portion comprimée puis détendue sortant du moyen détendeur 160.

[0071] Il est à noter qu'une ou plusieurs des conduites comprises dans cette installation de stockage peuvent être munies d'au moins une vanne propre et/ou d'un moyen régulateur apte à contrôler le débit de fluide circulant à l'intérieur de celles-ci.

[0072] Par ailleurs, une ou plusieurs des conduites comprises dans cette installation de stockage comprennent avantageusement des enveloppes d'isolation thermique (enveloppes d'isolation thermique non représentées sur les figures).

[0073] Comme indiqué ci-dessus, il est à noter que l'installation de stockage est en cycle fermé.

[0074] Un procédé de contrôle de la pression intérieure du réservoir 100 compris dans l'installation de stockage décrit ci-dessus va maintenant être décrit ci-dessous en référence aux différents états dans lesquels se retrouvent la portion de la fraction liquide prélevée au cours du déroulé du procédé, en particulier après chaque transformation thermodynamique (compression, détente).

[0075] Le réservoir 100 contient le fluide, de préférence de l'hydrogène liquide, formant la fraction liquide 1002 et la fraction gazeuse 1004. Ainsi, dans une étape préalable, une étape d'approvisionnement du réservoir 100 est réalisée via le circuit

d'approvisionnement. Cette étape d'approvisionnement est réalisée de préférence via un transfert d'hydrogène liquide, à l'aide de la première conduite d'approvisionnement du circuit d'approvisionnement, de la première source d'hydrogène liquide vers la première enveloppe du réservoir 100.

- [0076] Il est à noter qu'une étape d'alimentation d'éléments demandeurs peut être réalisée via la conduite d'alimentation à tout instant durant le procédé, en particulier simultanément ou non à la mise en œuvre d'une ou plusieurs étapes du procédé selon l'invention. Cette étape d'alimentation peut être réalisée plusieurs fois durant le procédé selon l'invention.
- [0077] Après l'étape d'approvisionnement, un équilibre thermodynamique se fait dans le réservoir 100 pour avoir une pression identique entre la fraction gazeuse 1004 et la fraction liquide 1002. Un échange thermique s'opère généralement dans le réservoir 100 et se traduit par un réchauffement de la fraction liquide 1002. L'équilibre thermodynamique va se modifier en conséquence. Une portion de la fraction liquide 1002 équivalente à la perte thermique se vaporise alors. Comme l'installation est en cycle fermé, la fraction gazeuse 1004 et la pression augmentent dans le réservoir 100. Or, si l'augmentation de la fraction gazeuse 1004 et de la pression est trop importante, il devient difficile, voire impossible d'approvisionner le réservoir 100.
- [0078] Pour pallier ces augmentations de la fraction gazeuse 1004 et de la pression, selon l'invention, une portion de la fraction liquide 1002 du fluide est donc prélevée, lors d'une étape de prélèvement, dans le réservoir 100 par la conduite d'extraction Cext.
- [0079] L'étape de prélèvement est de préférence mise en œuvre après la réalisation d'une étape de mesure d'un paramètre représentatif de la pression de la fraction gazeuse 1004 et/ou d'un paramètre représentatif de la pression de la fraction liquide 1002. En fonction de l'un et/ou l'autre de ces deux paramètres, on procède à la mise en œuvre de l'étape de prélèvement et des étapes qui suivent.
- [0080] Après l'étape de prélèvement, on obtient ainsi une portion prélevée définie à un état A par :
- une première température T1,
 - une première pression P1,
 - une première enthalpie E1, et
 - une première densité D1.
- [0081] La portion prélevée qui se trouve à l'état A ne présente pas de phase gazeuse et n'est constituée que d'une phase liquide. En particulier, cette portion prélevée se retrouve alors sur la courbe de saturation liquide caractéristique du fluide.
- [0082] Dans une variante de réalisation, le point A peut se retrouver éloigné ou sensiblement proche de la courbe de saturation liquide caractéristique du fluide, tout en étant dans la partie liquide.

- [0083] A l'aide de ce prélèvement et des étapes qui vont suivre, on régule la pression de la fraction gazeuse 1004 au sommet du réservoir 100 de façon à ce que cette pression reste inférieure à une valeur prédéterminée, par exemple inférieure à 20 bar, de préférence inférieure à 12 bar lorsque le fluide est de l'hydrogène.
- [0084] De préférence, l'étape de prélèvement est mise en œuvre de manière discontinue. Par exemple, l'étape de prélèvement peut être mise en œuvre à chaque fois que la pression intérieure du réservoir 100 devient égale ou supérieure à la valeur prédéterminée.
- [0085] De préférence, durant cette étape de prélèvement, le débit et le volume de la portion liquide du fluide extrait sont déterminés par les caractéristiques du moyen compresseur 120, c'est-à-dire par un débit nominal.
- [0086] Ensuite, dans une étape ultérieure, cette portion prélevée est comprimée dans le moyen compresseur 120. Cette compression est une compression sensiblement isothermique à la suite de laquelle on obtient une portion comprimée définie à un état B par :
- une deuxième température T_2 sensiblement égale à la première température T_1 ,
 - une deuxième pression P_2 supérieure à la première pression P_1 , et
 - une deuxième densité D_2 supérieure à la première densité D_1 .
- [0087] Avantagement, l'étape de compression est réalisée sur une gamme de pressions comprise entre 6 et 100 bar, de préférence entre 6 et 70 bar lorsque le fluide est de l'hydrogène. Il est à noter que l'élévation de pression associée à cette compression est inhérente aux caractéristiques du fluide comprimé.
- [0088] Il est à noter que la compression est apte à conduire à une diminution d'enthalpie entre la première enthalpie E_1 de l'état A et une deuxième enthalpie E_2 de l'état B sur une gamme de pressions prédéfinie. La compression entre l'état A et l'état B est sensiblement isentropique. Cette diminution d'enthalpie est permise car le coefficient de Joule-Thomson (en K/ bar) est positif pour la gamme de pressions prédéfinie alors que la compression est sensiblement isothermique. Il est à noter que le caractère positif du coefficient de Joule-Thomson pour une phase à saturation liquide s'illustre par le fait que, pour cette gamme de pressions prédéfinie, la pente de la courbe montrant l'évolution de l'enthalpie (en kJ/kg) en fonction de la pression (en bar) est négative. Cette compression est irréversible.
- [0089] Avantagement, l'étape de compression conduit à une baisse continue de l'enthalpie de la portion prélevée depuis l'état A jusqu'à l'état B.
- [0090] De préférence, l'étape de compression est réalisée depuis l'état A vers l'état B tant que le coefficient de Joule-Thomson caractéristique du fluide est positif. Cela permet de maximiser l'efficacité de l'installation.
- [0091] Cependant, l'étape de compression est avantagement arrêtée lorsque la baisse d'enthalpies de la portion comprimée est inférieure à 0,1 kJ/kg pour une hausse de

pression de 1 bar. Il est à noter que si l'étape de compression perdurait alors que la baisse d'enthalpies était inférieure à 0.1 kJ/kg, il serait difficile d'exploiter le point d'inflexion de la courbe enthalpique à température constante sans utiliser une grande quantité d'énergies.

- [0092] Lorsque le réservoir 100 est également le moyen détenteur 160 (voir [Fig.1]), la portion comprimée circule ensuite dans la conduite de transfert C11 qui relie le moyen compresseur 120 au moyen injecteur 1008.
- [0093] Lorsque le moyen compresseur 120 est relié directement ou indirectement au moyen détenteur 160 se trouvant en amont du moyen injecteur 1008 (voir figures 2 et 3), la portion comprimée circule ensuite dans la conduite de transfert C12 qui relie le moyen compresseur 120 au moyen détenteur 160 ou dans la conduite de transfert C13 qui relie le moyen compresseur 120 au réservoir tampon 140.
- [0094] Dans le cas où le moyen compresseur 120 est relié au réservoir tampon 140, une fois que la pression intérieure du réservoir tampon 140 atteint une pression prédéterminée et comprise entre 6 et 70 bar de préférence, la portion comprimée qui a été stockée dans le réservoir tampon 140 circule ensuite dans la deuxième conduite de transfert C23 qui mène au moyen détenteur 160.
- [0095] Dans une étape suivante, la portion comprimée subit alors une détente pour obtenir une portion détendue définie à un état C par :
- une troisième température T3 inférieure à la deuxième température T2,
 - une troisième pression P3 inférieure à la deuxième pression P2, et
 - une troisième densité D3 inférieure à la deuxième densité D2 et supérieure à la première densité D1.
- [0096] Selon la mise en œuvre de l'exemple de réalisation illustré sur la [Fig.1], la détente a lieu pendant ou après la réalisation d'une étape d'injection de la portion comprimée dans le réservoir 100, lorsque le réservoir 100 est également le moyen détenteur. De ce cas, l'état C est défini comme étant l'état d'équilibre dans le réservoir 100 après injection dans ce dernier de la portion comprimée. Ici, la détente peut donc être initiée durant l'injection et s'effectuer dans le réservoir 100.
- [0097] Dans ce premier exemple de réalisation illustré sur la [Fig.1], la détente n'est pas isenthalpique. La portion injectée dans le réservoir 100 est également définie par une troisième enthalpie E3 qui est inférieure à la première enthalpie E1 de la portion prélevée. Cela implique une diminution de la température intérieure du réservoir 100 après équilibre thermodynamique.
- [0098] Selon la mise en œuvre des exemples de réalisation illustrés sur les figures 2 et 3, la détente a lieu entre l'étape de compression et une étape ultérieure d'injection de la portion détendue dans le réservoir 100 lorsque l'installation comprend un moyen détenteur 160 distinct du réservoir 100. Dans ce cas, l'état C est défini comme étant

l'état dans lequel se retrouve la portion détendue avant d'être injectée dans le réservoir 100. Ainsi, on obtient une portion sortant du moyen détendeur 160 qui présente des propriétés qui se rapprochent des conditions thermodynamiques du réservoir 100.

[0099] Selon la mise en œuvre des exemples de réalisation illustrés sur les figures 2 et 3, la détente est de préférence isenthalpique. Une telle détente isenthalpique présente l'avantage de ne pas générer de chaleur.

[0100] De préférence, à l'état C, la portion détendue se retrouve sensiblement sur la courbe de saturation liquide caractéristique du fluide. Par exemple, à l'état C, P3 peut être comprise entre P1 et P2, de préférence entre P1 et la pression de saturation liquide du fluide à laquelle s'ajoute 0.1 bar. Par ailleurs, en procédant ainsi, on facilite l'injection dans le réservoir 100 de la portion à injecter.

[0101] La portion injectée dans le réservoir 100 est également définie par une troisième enthalpie E3 qui est inférieure à la première enthalpie E1 de la portion prélevée. Cela implique une diminution de la température intérieure du réservoir 100 après équilibre thermodynamique. Ainsi, la portion injectée dans le réservoir 100 est, entre autres, définie par une troisième température T3 inférieure à la première température T1 de sorte à permettre de compenser un éventuel échauffement dans le réservoir 100. En procédant ainsi, on évite donc une augmentation de la pression à l'intérieur du réservoir 100 qui aurait été inévitable si le procédé selon l'invention n'avait pas été mis en œuvre.

Exemples

[0102] L'installation de stockage selon le deuxième exemple de réalisation a été mis en œuvre avec de l'hydrogène comme fluide.

[0103] Le tableau de résultats d'expérimentations ci-dessous peut se lire en parallèle avec le diagramme illustré sur la [Fig.4] et sur la [Fig.5] en référence aux états A, B et C ci-avant mentionnés.

[0104] Comme illustré sur la [Fig.4], la courbe enthalpique à températures constantes d'hydrogène liquide environ égale à 30K présente une forme sensiblement parabolique. A l'état B, nous nous trouvons au point d'inflexion de la courbe enthalpique, le point d'inflexion correspondant à un minimum d'enthalpie sur une gamme de pressions comprise entre 8 bar et 30 bar.

[0105] Comme illustré par la [Fig.5], pour l'hydrogène la détente isenthalpique ne peut être mise en œuvre qu'au-dessus d'une pression de 5 bar à partir de laquelle le coefficient de Joules-Thomson devient positif.

[0106] En particulier, le tableau de résultats d'expérimentations ci-dessous permet de mieux visualiser les avantages tirés de la mise en œuvre du procédé conformes à l'invention.

[0107] Ce tableau indique des valeurs de températures (en K), pressions (en bar), densités

(en kg/m³), volumes (en m³/kg), énergie internes spécifiques (kJ/kg) et enthalpies (kJ/kg) d'hydrogène contenu initialement dans le réservoir 100 et circulant ensuite dans l'installation ci-avant décrite selon le procédé selon l'invention ci-avant décrit de sorte à se retrouver aux états A, B, C précités et que l'on retrouve sur la [Fig.4].

[0108] [Tableaux1]

Etat	Température (K)	Pression (bar)	Densité (kg/m ³)	Volume (m ³ /kg)	Enthalpie (kJ/kg)
A	30.2	8.5	53.37	0.019	149.02
B	30.2	23	60.39	0.017	138.83
C	29.8	8.5	54.93	0.018	183.83

[0109] On peut déduire de ce tableau les enseignements suivants. Entre les états B et C, une détente sensiblement isenthalpique a effectivement été mise en œuvre. Par ailleurs, à l'état C, la température T3 est bien inférieure à la température T1 définie à l'état A. De cette façon, la densité D3 définie à l'état C est bien supérieure à la densité D1 définie à l'état A.

[0110] Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux exemples particuliers décrits et illustrés dans la présente demande. D'autres variantes ou modes de réalisation à la portée de l'homme du métier peuvent aussi être envisagés sans sortir du cadre de l'invention, telle que définie par les revendications.

Revendications

- [Revendication 1] Procédé de contrôle de la pression intérieure d'un réservoir (100) cryogénique contenant une fraction liquide (1002) et une fraction gazeuse (1004) d'un fluide dont l'enthalpie peut baisser lors d'une compression isothermique en phase liquide, le procédé comprenant les étapes suivantes :
- prélèvement d'une portion de la fraction liquide pour obtenir une portion prélevée définie à un état A par :
 - une première température T1,
 - une première pression P1,
 - une première enthalpie E1, et
 - une première densité D1,
 - compression sensiblement isothermique de la portion prélevée pour obtenir une portion comprimée définie à un état B par :
 - une deuxième température T2 sensiblement égale à la première température T1,
 - une deuxième pression P2 supérieure à la première pression P1, et
 - une deuxième densité D2 supérieure à la première densité D1,
 ladite compression étant destinée à conduire à une diminution d'enthalpie entre la première enthalpie E1 de l'état A et une deuxième enthalpie E2 de l'état B,
 - détente de la portion comprimée pour obtenir une portion détendue définie à un état C par :
 - une troisième température T3 inférieure à la deuxième température T2,
 - une troisième pression P3 inférieure à la deuxième pression P2, et
 - une troisième densité D3 inférieure à la deuxième densité D2 et supérieure à la première densité D1,
 - injection de la portion comprimée ou de la portion détendue dans le réservoir (100),
 ladite détente étant réalisée après l'étape d'injection lorsque la portion comprimée est injectée dans le réservoir (100), ou ladite détente étant réalisée entre l'étape de compression et l'étape d'injection lorsque la portion détendue est injectée

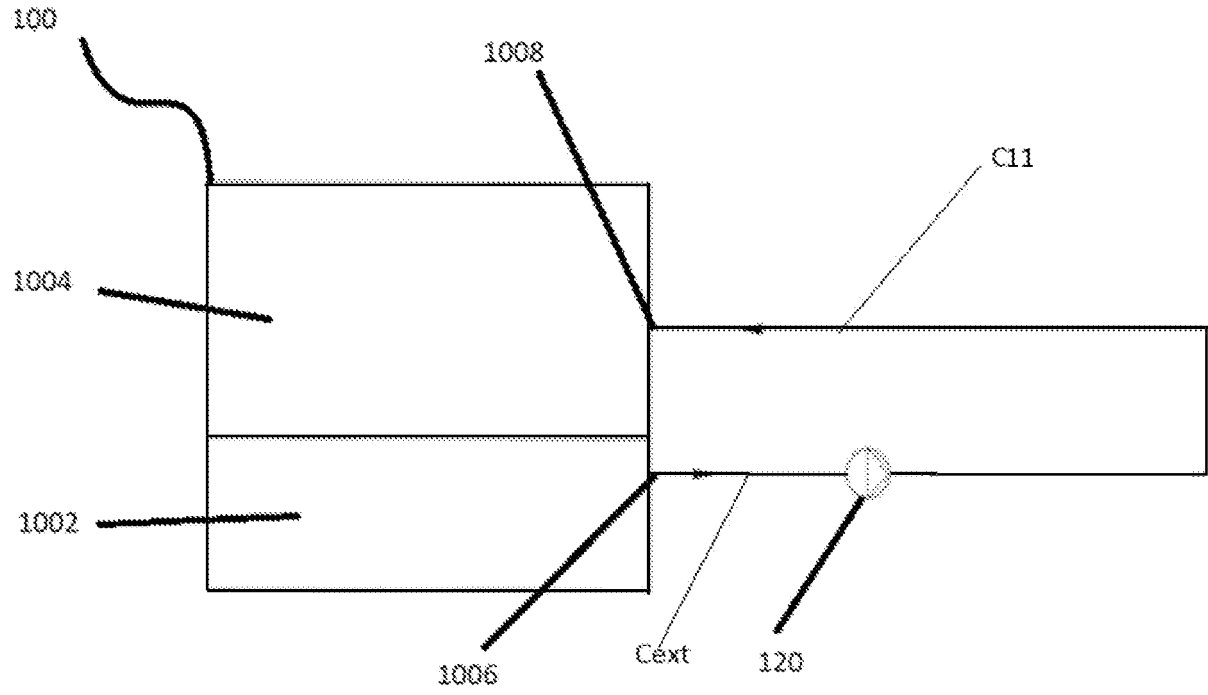
dans le réservoir (100).

- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, selon lequel l'étape de compression conduit à une baisse continue de l'enthalpie de la portion prélevée depuis l'état A jusqu'à l'état B.
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 2, selon lequel l'étape de compression est arrêtée lorsque la baisse d'enthalpie de la portion comprimée est inférieure à 0,1 kJ/kg pour une hausse de pression de 1 bar.
- [Revendication 4] Procédé selon la revendication 1, selon lequel le fluide est de l'hydrogène.
- [Revendication 5] Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, selon lequel la troisième pression P3 est supérieure ou sensiblement égale à la première pression P1.
- [Revendication 6] Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, selon lequel la détente est une détente sensiblement isenthalpique lorsque celle-ci est réalisée entre l'étape de compression et l'étape d'injection.
- [Revendication 7] Installation de stockage d'une fraction liquide (1002) et d'une fraction gazeuse (1004) d'un fluide configurée pour mettre en œuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, l'installation comprenant :
- un réservoir (100) cryogénique destiné à contenir le fluide,
 - un moyen de prélèvement (1006) d'une portion de la fraction liquide (1002),
 - un moyen compresseur (120) apte à réaliser une compression sensiblement isothermique de la portion prélevée pour obtenir une portion comprimée, le moyen compresseur (120) contenant un groupe de réfrigération,
 - un moyen détenteur (160) apte à réaliser une détente de la portion comprimée pour obtenir une portion détendue, et
 - un moyen injecteur (1008) apte à injecter dans le réservoir (100) cryogénique la portion comprimée ou la portion détendue,
- installation dans laquelle le moyen détenteur (160) et le réservoir (100) sont, soit confondus, soit distincts.
- [Revendication 8] Installation selon la revendication 7, comprenant en outre un réservoir

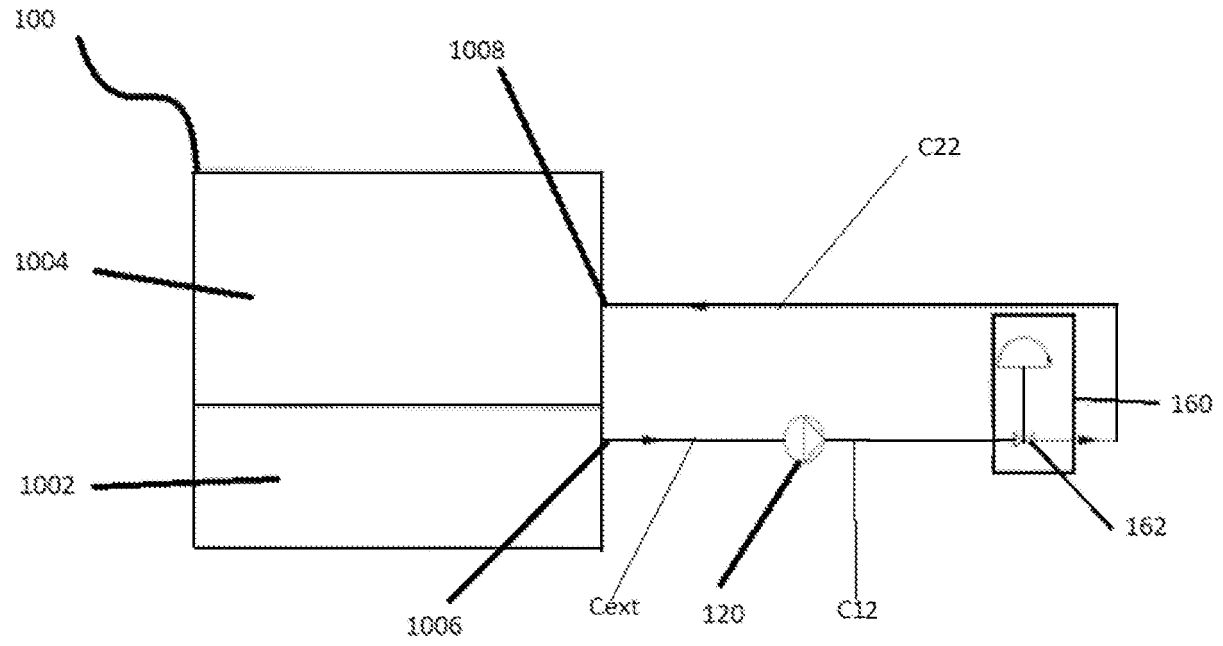
tampon (140) disposé entre le moyen compresseur (120) et le moyen détenteur (160).

[Revendication 9] Installation selon l'une des revendications 7 ou 8, dans lequel le moyen détenteur (160) comprend une vanne de laminage (162).

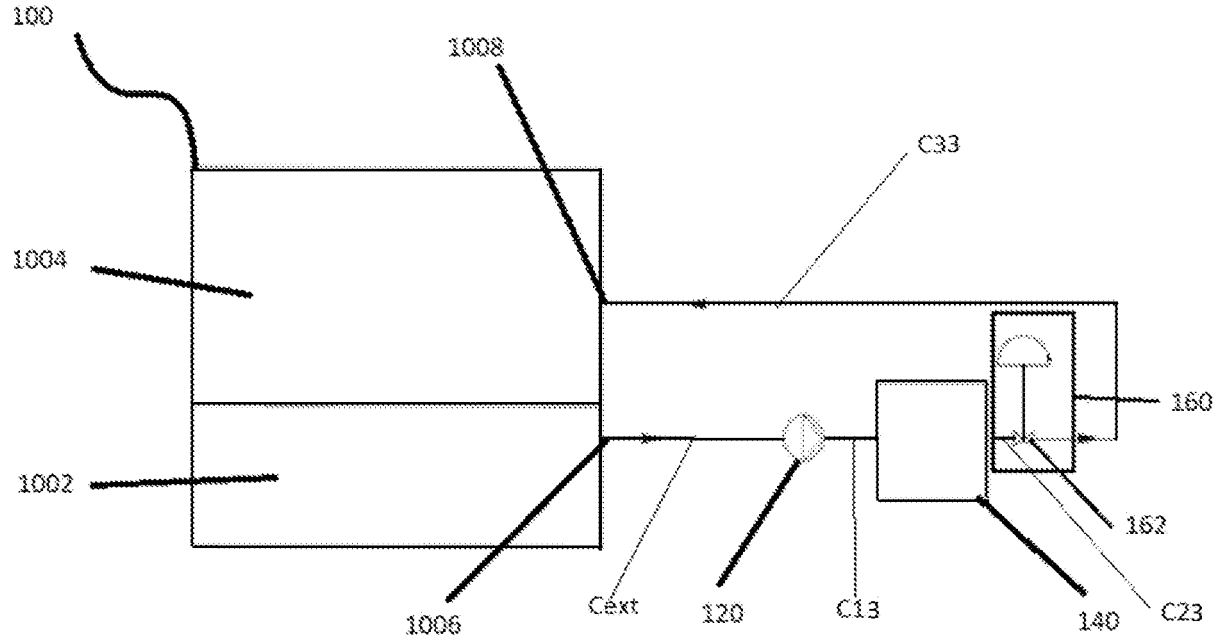
[Fig. 1]



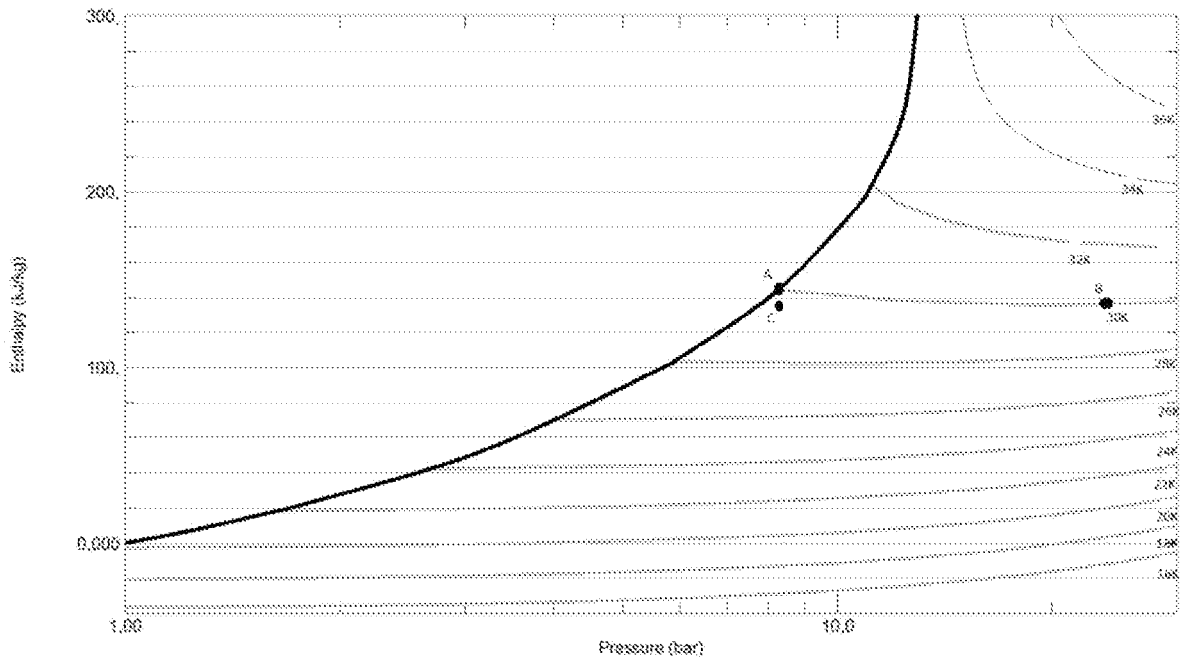
[Fig. 2]



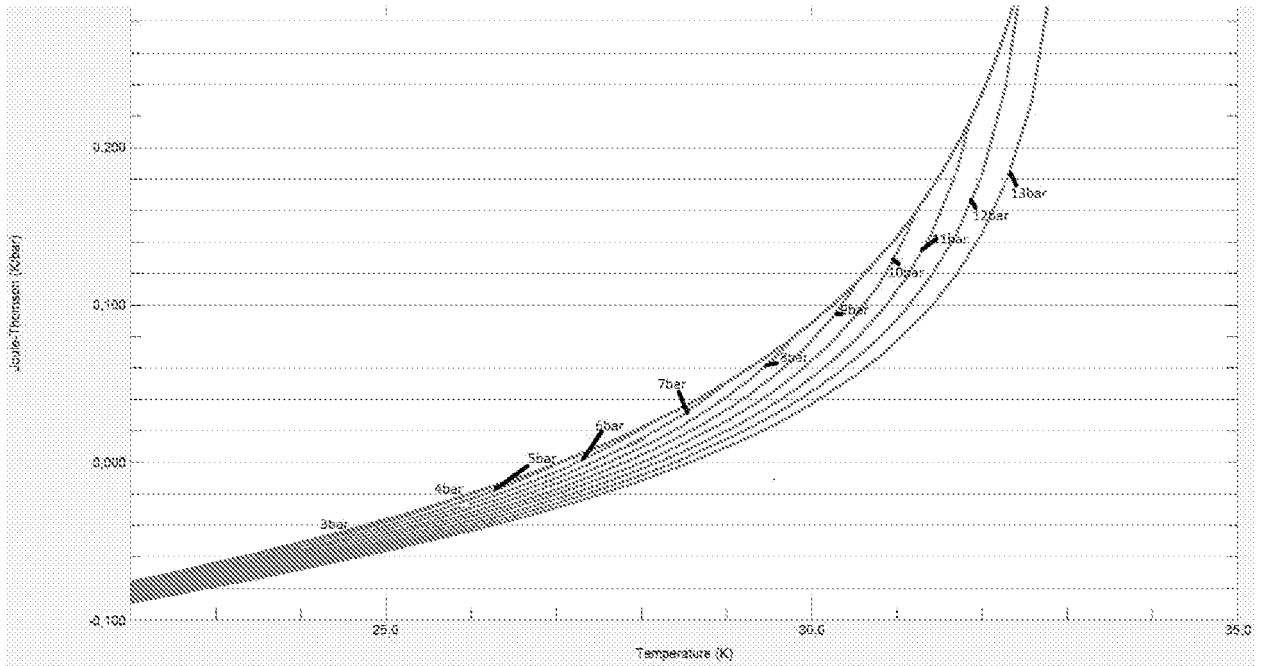
[Fig. 3]



[Fig. 4]



[Fig. 5]



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**

FR 3 088 407 A1 (ENGIE [FR])
15 mai 2020 (2020-05-15)

FR 3 060 707 A1 (ENGIE [FR])
22 juin 2018 (2018-06-22)

FR 3 060 708 A1 (ENGIE [FR])
22 juin 2018 (2018-06-22)

US 6 634 178 B1 (MICHEL FRIEDEL [DE] ET
AL) 21 octobre 2003 (2003-10-21)

US 2021/396353 A1 (LI XIANMING [US] ET AL)
23 décembre 2021 (2021-12-23)

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

NEANT

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

NEANT