

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 25.02.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 01.09.23 Bulletin 23/35.

56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : ABSOLUT SYSTEM Société par actions simplifiée à associé unique — FR.

72 Inventeur(s) : LACAPERE Jerome et REHAYEM Elias.

73 Titulaire(s) : ABSOLUT SYSTEM Société par actions simplifiée à associé unique.

74 Mandataire(s) : REGIMBEAU.

54 Système de refroidissement cryogénique.

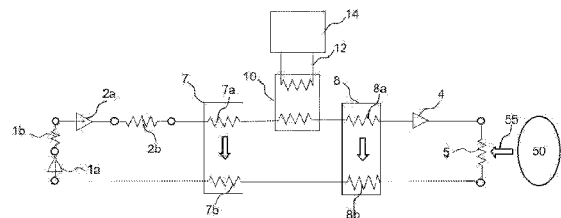
57 L'invention concerne un système de refroidissement cryogénique comprenant:

au moins un compresseur (1a, 2a) pour comprimer un gaz cryogénique et au moins un radiateur (1b, 2b) pour refroidir le gaz cryogénique comprimé, au moins un détendeur (4), un échangeur de chaleur (5) adapté pour être couplé à un appareil à refroidir, deux échangeurs récupérateurs (7, 8), adaptés pour un échange d'énergie thermique entre le gaz cryogénique comprimé et le gaz cryogénique détendu en aval de l'échangeur de chaleur (5),

caractérisé en ce qu'il comprend au moins un échangeur thermique intermédiaire (10), refroidi par un dispositif de refroidissement (14),

et en ce que l'échangeur thermique intermédiaire (10) est agencé de sorte à refroidir le gaz cryogénique provenant du premier échangeur-récupérateur (7) avant le passage dudit gaz cryogénique dans le second échangeur-récupérateur, le détendeur (4) étant agencé en aval dudit second échangeur-récupérateur de sorte à refroidir ledit gaz à une température cryogénique.

Figure pour l'abrégé: Fig 2



Description

Titre de l'invention : Système de refroidissement cryogénique

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne un système de refroidissement cryogénique.

Etat de la technique

[0002] Un système de refroidissement du type Turbo-Brayton utilise des procédés de compression, de refroidissement, et de détente afin d'obtenir un refroidissement par expansion adiabatique d'un gaz initialement à température ambiante.

[0003] Un tel système de refroidissement peut avoir plusieurs niveaux de compression par des compresseurs successifs. Chaque compression engendre un réchauffement du gaz comprimé. En général, la compression de gaz est effectuée à température ambiante et un radiateur ou un autre dispositif de refroidissement est utilisé en aval de chaque compresseur de manière à refroidir le gaz comprimé à une température proche de la température ambiante, en dissipant de l'énergie du gaz comprimé. Le gaz comprimé est ensuite fortement refroidi dans un échangeur récupérateur et atteint ensuite sa température minimale par une expansion en aval dudit échangeur récupérateur. Le gaz peut donc être utilisé pour l'application envisagée, par exemple le refroidissement d'un appareil supraconducteur tel qu'un moteur de propulsion, ou la liquéfaction d'un autre gaz tel que l'hydrogène.

[0004] Pendant l'utilisation, la température du gaz augmente suite à l'échange thermique avec l'appareil à refroidir. Le gaz est ensuite réutilisé en tant que source froide pour refroidir le gaz comprimé dans l'échangeur récupérateur et sa température augmente à une valeur proche de la température ambiante. En général, le gaz est directement ré-introduit dans le système de compressions successives.

[0005] Pour le refroidissement des moyens de propulsion électrique utilisant des éléments supraconducteurs, on nécessite des échangeurs récupérateurs efficaces pour un échange de chaleur entre une température basse d'environ 20K et une température haute qui est légèrement au-dessus de la température de l'environnement du système, qui est typiquement autour de 290K au sol et peut baisser jusqu'à environ 220K pour un avion en altitude.

[0006] Pour la condensation ou liquéfaction de l'hydrogène à partir de vapeur d'hydrogène froide, la température basse est de 205 K, nécessitant des échangeurs récupérateurs également très performants.

[0007] La [Fig.1] illustre un tel système de refroidissement. Après les étapes de compression dans les compresseurs 1a et 2a, le gaz comprimé est refroidi à température ambiante par les radiateurs 1b et 2b. Le gaz est ensuite refroidi à une température d'environ

20-25 K en passant par un échangeur récupérateur 3 (« counterflow heat exchanger » selon la terminologie anglo-saxonne) dans le conduit 3a. Après ce passage, le gaz est détendu dans un organe de détente 4 qui est typiquement une turbine d'expansion. A la sortie de l'organe de détente 4, le gaz atteint une température de 17-18 K et est donc apte à refroidir une application 50 telle qu'un moteur supraconducteur à 20 K.

[0008] Après l'échange thermique 55 dans l'échangeur 5, la température du gaz devient proche de 20K. Par l'intermédiaire du conduit 3b, le gaz est reconduit dans l'échangeur récupérateur 3, dans lequel il est utilisé pour refroidir le gaz comprimé à température ambiante dans le conduit 3a. Lors de cette dernière étape ledit gaz est réchauffé à une température proche de la température ambiante et peut être réintroduit dans le procédé de compressions successives à partir du compresseur 1a.

[0009] De tels systèmes de refroidissement sont lourds et très encombrants. Même pour des durées de refroidissement relativement courtes, par exemple un vol de courte durée, le système requis présente un encombrement et une masse importants car il nécessite les mêmes composants qu'un système conçu pour un refroidissement de longue durée. Par ailleurs, la consommation électrique de tels systèmes est élevée.

Exposé de l'invention

[0010] Un but de l'invention est de concevoir un système de refroidissement cryogénique plus léger et moins encombrant, ayant une consommation électrique réduite, comprenant :

- [0011] • au moins un compresseur pour comprimer un gaz cryogénique et au moins un radiateur agencé en aval dudit compresseur pour refroidir le gaz cryogénique comprimé,
- au moins un détendeur pour détendre le gaz cryogénique comprimé,
 - un échangeur de chaleur adapté pour être couplé à un appareil à refroidir par le gaz cryogénique détendu,
 - deux échangeurs récupérateurs, adaptés pour un échange d'énergie thermique entre le gaz cryogénique comprimé en amont du détendeur et le gaz cryogénique détendu en aval de l'échangeur de chaleur,

[0012] caractérisé en ce qu'il comprend au moins un échangeur thermique intermédiaire, refroidi par un dispositif de refroidissement, et en ce que l'échangeur thermique intermédiaire est agencé de sorte à refroidir le gaz cryogénique provenant du premier échangeur-récupérateur avant le passage dudit gaz cryogénique dans le second échangeur-récupérateur, le détendeur étant agencé en aval dudit second échangeur-récupérateur de sorte à refroidir ledit gaz à une température cryogénique.

[0013] Un tel système est versatile dans le sens qu'il permet d'adapter sa masse et son volume à la durée d'utilisation. Le système permet également de s'adapter localement

aux contraintes, car l'échangeur intermédiaire peut être refroidi par différentes sources froides.

- [0014] Dans certains modes de réalisation, le dispositif de refroidissement comprend un fluide cryogénique assurant un échange thermique avec l'échangeur thermique intermédiaire. Ainsi, on peut adapter le poids et l'encombrement en fonction de la durée d'utilisation, tel que la durée d'un vol pour une application dans un avion, en limitant le volume de fluide cryogénique au volume requis pour la durée de l'utilisation du système. De manière avantageuse, le fluide cryogénique est de l'azote ou du méthane.
- [0015] Dans d'autres modes de réalisation, le dispositif de refroidissement comprend au moins un cryoréfrigérateur du type Turbo-Brayton, un cryoréfrigérateur basé sur le cycle Stirling ou un tube pulsé.
- [0016] De manière avantageuse, l'efficacité du premier échangeur récupérateur est inférieure à l'efficacité du deuxième échangeur récupérateur.
- [0017] De préférence, l'échangeur de chaleur est adapté pour refroidir un appareil à une température comprise entre 17 K et 50 K et plus avantageusement comprise entre 17 K et 20 K.
- [0018] Avantageusement, les radiateurs comportent des éléments de fixation adaptés pour maintenir ledit échangeur de chaleur sur une paroi extérieure d'un aéronef ou sont thermiquement connectés à une structure refroidie par l'environnement externe dudit aéronef.
- [0019] L'invention se rapporte aussi à un véhicule ou aéronef à propulsion électrique utilisant au moins un élément supraconducteur comprenant un système de refroidissement cryogénique tel que décrit ci-dessus, ledit système de refroidissement étant agencé de sorte à coupler thermiquement l'échangeur de chaleur à l'au moins un élément supraconducteur à refroidir. De préférence, les radiateurs sont agencés sur une paroi extérieure dudit véhicule ou aéronef ou en échange thermique avec l'environnement externe dudit véhicule ou aéronef.
- [0020] De manière avantageuse, ledit véhicule ou aéronef à propulsion électrique comprend un connecteur fluide apte à connecter fluidiquement la source froide à une source de fluide cryogénique pour refroidir l'échangeur thermique à une température cryogénique. Avantageusement, ledit véhicule ou aéronef à propulsion électrique comprend en outre un réservoir de fluide cryogénique agencé dans ledit véhicule ou aéronef, ledit fluide cryogénique étant en liaison fluide avec l'échangeur thermique intermédiaire pour refroidir ledit échangeur thermique à une température cryogénique.
- [0021] L'invention concerne également une installation de liquéfaction d'hydrogène, comprenant un véhicule, un conteneur ou un aéronef, un système de refroidissement cryogénique tel que décrit ci-dessus, agencé dans ledit véhicule, conteneur ou aéronef, ladite installation étant agencée de sorte à coupler thermiquement l'échangeur de

chaleur à une source d'hydrogène à liquéfier ou en élément supraconducteur. Dans certains modes de réalisation, ladite installation de liquéfaction d'hydrogène, comprend un réservoir de fluide cryogénique agencé dans ledit véhicule ou conteneur ou aéronef, ledit réservoir étant en liaison fluïdique avec l'échangeur thermique intermédiaire pour refroidir ledit échangeur thermique intermédiaire à une température cryogénique grâce au fluide cryogénique. Dans d'autres modes de réalisation, l'installation de liquéfaction d'hydrogène comprend un connecteur adapté pour établir une liaison fluïdique entre l'échangeur thermique intermédiaire et un réservoir de fluide cryogénique à l'extérieur dudit véhicule, conteneur ou aéronef, pour refroidir ledit échangeur thermique intermédiaire à une température cryogénique.

[0022] L'invention se rapporte aussi à un procédé de refroidissement cryogénique, comprenant les étapes suivantes :

- [0023]
- une ou plusieurs étapes de compression d'un gaz cryogénique dans un compresseur et une étape de refroidissement dudit gaz comprimé par un radiateur après chaque étape de compression,
 - le passage dudit gaz dans un premier échangeur-récupérateur de sorte à refroidir le gaz comprimé à une première température,
 - le passage du gaz en aval du premier échangeur-récupérateur dans un échangeur thermique intermédiaire, refroidi par un dispositif de refroidissement, de sorte à refroidir le gaz provenant du premier échangeur-récupérateur à une température intermédiaire inférieure à la première température,
 - le passage dudit gaz en aval de l'échangeur intermédiaire dans un second échangeur-récupérateur, de sorte à refroidir le gaz provenant de l'échangeur thermique intermédiaire à une seconde température inférieure à la température intermédiaire,
 - l'expansion dudit gaz dans un organe de détente de sorte à refroidir ledit gaz à une température cryogénique inférieure à la seconde température,
 - l'utilisation dudit gaz pour le refroidissement d'un appareil à refroidir,
 - le passage dudit gaz en aval de l'appareil à refroidir dans le second échangeur-récupérateur et le premier échangeur-récupérateur en récupérant l'énergie thermique du gaz comprimé dans le circuit.

Brève description des figures

[0024] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée qui va suivre, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

[0025] La [Fig.1] est une vue schématique d'un système de refroidissement cryogénique du type Turbo-Brayton conventionnel.

[0026] La [Fig.2] est une vue schématique d'un système de refroidissement cryogénique

selon l'invention.

[0027] La [Fig.3] illustre l'application d'un système de refroidissement cryogénique selon l'invention dans un aéronef.

[0028] La [Fig.4] montre en détail le système de refroidissement de la [Fig.3].

[0029] La [Fig.5] illustre l'application d'un système de refroidissement cryogénique selon l'invention dans un conteneur mobile.

Description détaillée de modes de réalisation

Structure du système de refroidissement

[0030] La [Fig.2] est une vue schématique d'un système de refroidissement cryogénique selon l'invention. Le système comprend un ou plusieurs radiateurs 1b, 2b situés chacun en sortie d'un compresseur 1a, 2a respectif. Le système comprend en outre deux échangeurs-récupérateurs 7 et 8. Chaque échangeur-récupérateur comprend un conduit de refroidissement 7a, 8a en aval du ou des radiateurs 1b, 2b et en amont d'un ou plusieurs détendeurs 4, et un conduit de récupération 7b, 8b en échange thermique avec le conduit de refroidissement 7a, 8a de l'échangeur-récupérateur 7, 8 respectif. Le détendeur est par exemple une turbine d'expansion ou un détendeur du type Joule-Thompson. Pour augmenter l'efficacité du système, plusieurs détendeurs peuvent être agencés en série ou en parallèle.

[0031] Un échangeur thermique intermédiaire 10 est agencé entre le conduit de refroidissement 7a du premier échangeur récupérateur 7 et le conduit de refroidissement 8a du second échangeur-récupérateur 8.

[0032] L'échangeur thermique intermédiaire procure un environnement froid permettant, par échange de chaleur, de refroidir le gaz en aval du conduit de refroidissement 7a du premier échangeur récupérateur 7 et en amont du conduit de refroidissement 8a du second échangeur-récupérateur 8. Par « froid », on entend dans le présent texte que la zone ou l'élément concerné est à une température cryogénique, c'est-à-dire une température typiquement inférieure à 150 K.

[0033] A titre d'exemple illustratif et non limitatif, l'échangeur thermique intermédiaire 10 peut être un cryoréfrigérateur du type Turbo-Brayton ou un cryoréfrigérateur basé sur le cycle Stirling ou un tube pulsé, ou une combinaison de plusieurs cryoréfrigérateurs du même type ou de types différents. De manière alternative, l'échangeur thermique intermédiaire 10 peut être un échangeur en liaison fluïdique 12 avec un fluide de refroidissement dans un réservoir 14, ou immergé dans un bain de fluide de refroidissement. Dans ce cas, le fluide cryogénique circule de manière à utiliser la capacité calorifique dudit fluide cryogénique pour le refroidissement du gaz en aval du conduit de refroidissement 7a du premier échangeur récupérateur 7 et en amont du conduit de refroidissement 8a du second échangeur-récupérateur 8. De manière

avantageuse, le fluide cryogénique est un liquide cryogénique ayant une forte puissance cryogénique grâce à sa chaleur latente, comme par exemple l'azote liquide ou le méthane liquide. Dans certains modes de réalisation, l'échangeur thermique intermédiaire est une combinaison d'un cryoréfrigérateur et d'un dispositif refroidi à l'aide d'un fluide cryogénique.

[0034] Un échangeur thermique 5, agencé en aval du ou des détendeurs 4, permet l'échange thermique 55 avec l'application 50. L'application est, à titre illustratif et non limitatif, un moteur supraconducteur par exemple dans un aéronef, ou un système de refroidissement ou de liquéfaction d'hydrogène.

[0035] Ledit échangeur thermique 5 est lié fluidiquement au conduit de récupération 8b du second échangeur-récupérateur 8, qui est à son tour en liaison fluidique avec le conduit de récupération 7b du premier échangeur-récupérateur 7.

[0036] Un conduit apte à réintroduire le gaz dans le compresseur 1a est agencé en aval du conduit de récupération 7b du premier échangeur-récupérateur 7.

Fonctionnement du système de refroidissement

[0037] Afin de refroidir une application 50, on comprime un gaz cryogénique compris dans le système dans les compresseurs 1a et 2a, une telle compression produisant un échauffement dudit gaz. De préférence, ledit gaz cryogénique est de l'hélium. De manière alternative, le gaz peut être un mélange d'hélium et de néon, ou de l'hydrogène, ou encore un mélange d'hydrogène et de néon, ou un mélange des trois fluides cités. Après chaque étape de compression, le gaz comprimé est refroidi à une température proche de la température ambiante du système par un radiateur 1b ou 2b. La température ambiante est typiquement autour de 290K au sol et peut baisser jusqu'à environ 220K pour un avion en altitude.

[0038] Le gaz comprimé est ensuite refroidi à une première température basse, par exemple de 90 K en passant par l'échangeur récupérateur 7 dans le conduit 7a. Le gaz est ensuite refroidi par l'échangeur thermique intermédiaire 10 à une température intermédiaire, par exemple de 80 K.

[0039] Le gaz en aval de l'échangeur intermédiaire est refroidi à une seconde température basse, par exemple de 22 K en passant par l'échangeur récupérateur 8 dans le conduit 8a. La température intermédiaire est inférieure à la première température basse, et supérieure à la seconde température basse.

[0040] Après ce passage, le gaz est détendu dans le ou les détendeurs 4. A la sortie du ou des détendeurs 4, le gaz atteint sa température minimale (inférieure à 20 K) et est conduit dans l'échangeur 5 connecté thermiquement à l'application envisagée 50.

[0041] Après l'échange thermique 55 dans l'échangeur 5, la température du gaz devient proche de la température de l'application 50. Par l'intermédiaire du conduit 8b, le gaz est reconduit dans le second échangeur récupérateur 8, dans lequel il est utilisé pour

refroidir le gaz comprimé à la température intermédiaire dans le conduit 8a. Ensuite, par l'intermédiaire du conduit 7b, le gaz est reconduit dans le premier échangeur récupérateur 7, dans lequel il est utilisé pour refroidir le gaz comprimé à température ambiante dans le conduit 7a. Lors de cette dernière étape ledit gaz est réchauffé à une température proche de la température ambiante et peut être réintroduit dans le procédé de compressions successives à partir du compresseur 1a.

Applications

- [0042] A titre d'exemple illustratif et non limitatif, le système peut être utilisé pour le refroidissement des composants supraconducteurs d'un moteur, par exemple pour la propulsion d'un aéronef.
- [0043] Un tel moteur pour aéronef peut comprendre des composants, par exemple des bobines électromagnétiques, réalisés en matériau supraconducteur, permettant une augmentation de la puissance de la machine. Ces composants doivent être maintenus à une température inférieure à la température critique la plus basse des composants supraconducteurs pendant la durée du fonctionnement du moteur.
- [0044] Le système peut également être utilisé pour refroidir un générateur supraconducteur ou tout autre système supraconducteur, par exemple un câble ou un limiteur de courant. Dans ce cas, la température du gaz cryogénique à l'entrée de l'échangeur 5 est typiquement proche de 20 K. Le système est donc apte à refroidir l'élément supraconducteur à une température comprise entre 20 et 50 K.
- [0045] La [Fig.3] illustre un aéronef 90 équipé d'un turbo-générateur 95 à refroidir, de deux moteurs supraconducteurs à refroidir, et d'un système de refroidissement 91 selon l'invention. L'aéronef 90 comprend un réservoir 92 contenant un liquide cryogénique, par exemple du méthane liquide à 110K, destiné à refroidir le turbo-générateur 95 utilisé pour générer l'énergie électrique nécessaire pour le fonctionnement de l'aéronef. Ce méthane liquide est en outre utilisé pour refroidir l'échangeur thermique intermédiaire du système de refroidissement 91.
- [0046] Le système de refroidissement 91 comprend deux radiateurs 98 en sortie des 2 compresseurs. Les radiateurs 98 sont agencés à proximité de la paroi 97 permettant un contact thermique avec l'air à l'extérieur de l'aéronef, qui représente une température d'environ 220 K en altitude. De manière alternative, un échangeur thermique peut être utilisé pour établir un contact thermique entre l'air extérieur et les radiateurs 98.
- [0047] En référence à la [Fig.4], le liquide cryogénique dans le réservoir 92 est utilisé pour le refroidissement de l'échangeur thermique intermédiaire du système de refroidissement 91, et ensuite utilisé pour le refroidissement du turbo-générateur 95 pour la production d'énergie électrique. Les conduits de refroidissement 99 du générateur 95 et les conduits de refroidissement 96 des moteurs supraconducteurs sont refroidis par le système de refroidissement 91 à une température proche de 20 K.

- [0048] De manière alternative, le système peut être utilisé pour une liquéfaction ou re-liquéfaction d'hydrogène ou un refroidissement d'hydrogène liquide pendant son stockage. Par liquéfaction, on entend un procédé de passage de l'hydrogène d'un état gazeux à un état liquide à partir d'hydrogène à température ambiante, c'est-à-dire à une température d'environ 280-300 K, qui implique de refroidir l'hydrogène puis de le liquéfier. Par re-liquéfaction ou condensation, on entend un procédé de passage de l'hydrogène d'un état gazeux à un état liquide à partir de vapeurs froides qui viennent d'être générées par évaporation d'une partie de l'hydrogène liquide et qui sont encore froides, c'est-à-dire à une température proche de celle de l'hydrogène liquide. La re-liquéfaction ou condensation implique donc uniquement de liquéfier l'hydrogène sans passer par une phase de refroidissement car les vapeurs sont déjà froides. Par sous-refroidissement, on entend un procédé de refroidissement de l'hydrogène liquide à une température inférieure à la température de liquéfaction.
- [0049] Pour la liquéfaction, la re-liquéfaction ou le sous-refroidissement d'hydrogène, la température du gaz cryogénique à l'entrée de l'échangeur 5 est de 17-35K. Ledit gaz est donc apte à liquéfier de l'hydrogène à une température entre 20 et 35 K, ou à sous-refroidir de l'hydrogène liquide à une température comprise entre 20 et 30K. L'échangeur de chaleur 5 doit être adapté pour fonctionner à une température comprise entre 17 K et 35 K et plus avantageusement comprise entre 17 K et 25 K.
- [0050] Pendant le stockage d'hydrogène à une température cryogénique, on maintient un refroidissement continu, afin de limiter une montée en pression dans le réservoir de stockage et d'éviter des pertes d'hydrogène par évaporation. De manière alternative, le refroidissement peut être appliqué par intermittence à intervalles réguliers, en laissant monter la pression dans le réservoir jusqu'à une pression limite puis en déclenchant le refroidissement pour faire diminuer la pression.
- [0051] L'hydrogène peut être utilisé pour alimenter une pile à combustible ou un moteur à combustion à hydrogène, également dans les applications en aéronautique. Un système de refroidissement peut ainsi être utilisé en aéronautique pour un refroidissement simultané d'une quantité d'hydrogène et des composants supraconducteurs.

Utilisation et avantages

- [0052] L'échangeur thermique intermédiaire 10 est utilisé pour refroidir le gaz cryogénique pendant son écoulement à haute pression à une température intermédiaire, plus haute que la température froide requise par l'application. Le premier échangeur-récupérateur 7 est utilisé pour baisser la température en amont de l'échangeur thermique intermédiaire. Plus l'échangeur thermique intermédiaire 10 apporte du refroidissement supplémentaire, moins le premier échangeur-récupérateur nécessite de puissance de refroidissement, et inversement. On peut donc ajuster les puissances du premier échangeur-récupérateur 7 et de l'échangeur thermique intermédiaire 10 selon les contraintes de

l'environnement dans lequel le système de refroidissement est utilisé.

- [0053] Le premier échangeur-récupérateur 7 peut donc être considérablement moins encombrant et moins lourd qu'un échangeur-récupérateur dans un système de refroidissement connu tel que décrit ci-dessus, fournissant la même température froide. Le second échangeur-récupérateur 8 est utilisé en aval de l'échangeur thermique intermédiaire 10 à plus proche de celle requise par l'application. Concernant le second échangeur-récupérateur 8, une puissance de refroidissement plus faible que dans un système connu est suffisante pour obtenir le refroidissement souhaité. La consommation électrique de chaque compresseur 1a, 2a en aval du premier échangeur-récupérateur 7 est réduite.
- [0054] Le second échangeur-récupérateur 8 peut donc être considérablement moins encombrant et moins lourd qu'un échangeur-récupérateur dans un système de refroidissement connu fournissant la même puissance froide à la même température froide.
- [0055] Grâce à l'échangeur thermique intermédiaire 10, le débit du cycle de refroidissement peut être réduit d'un facteur d'environ 2 ou 3 par rapport à un système de refroidissement connu, pour obtenir une puissance transmise identique au niveau de l'échangeur 5.
- [0056] Par exemple, pour une température froide de 20 K à une puissance donnée, le volume et la masse de chaque échangeur-récupérateur peut être réduite d'un facteur compris entre 4 et 5 par rapport à celle un échangeur-récupérateur dans un système de refroidissement connu et la consommation électrique de chaque compresseur est réduite d'un facteur compris entre 3 et 4.
- [0057] Même en considérant le besoin de deux échangeurs-récupérateurs et d'un échangeur thermique intermédiaire, un système selon l'invention permet une réduction en masse et encombrement et simultanément une réduction de la consommation électrique en fonction des composants utilisés par rapport à un système de refroidissement connu.
- [0058] Le second échangeur-récupérateur 8 nécessite un certain niveau d'efficacité afin d'atteindre la seconde température basse qui est par exemple d'environ 20 K. Avantageusement, le premier échangeur-récupérateur 7 présente une efficacité inférieure qui est généralement suffisante pour le refroidissement à la première température basse et permet de dimensionner le premier échangeur-récupérateur de manière plus légère et moins encombrante.
- [0059] En particulier, quand le refroidissement est à effectuer pendant une période limitée, par exemple un vol de courte durée, l'échangeur thermique intermédiaire peut être alimenté par une quantité de fluide cryogénique limitée, refroidie avant le vol par un système au sol. On peut ainsi dimensionner la masse et l'encombrement du système de refroidissement selon la durée du refroidissement requise.
- [0060] On peut ainsi effectuer un refroidissement de durée limitée pendant un trajet en

véhicule, un transport d'un conteneur par exemple par un bateau ou un véhicule, ou un vol en aéronef. Dans ce cas, ledit véhicule, conteneur ou aéronef comprend un système de refroidissement dans lequel au moins une partie du refroidissement de l'échangeur thermique intermédiaire 10 est effectué par un fluide cryogénique. Le véhicule, conteneur ou aéronef comprend en outre un réservoir adapté pour stocker une quantité de fluide cryogénique suffisante pour le trajet prévu. Avantageusement, le véhicule, conteneur ou aéronef comprend en outre un connecteur apte à connecter fluidiquement la source froide à une source de fluide cryogénique au sol. On peut ainsi remplir le réservoir avant le trajet ou vol afin de refroidir l'échangeur thermique à une température cryogénique pendant le trajet ou vol.

[0061] Dans d'autres cas, le refroidisseur cryogénique est agencé dans un conteneur mobile, qui peut être agencé à bord d'un véhicule ou aéronef. Le refroidissement est effectué quand ledit conteneur est au repos. Le refroidissement de l'échangeur thermique intermédiaire peut être effectué en utilisant une source froide agencée à un endroit fixe. Par exemple, l'échangeur thermique intermédiaire est en liaison fluidique avec un réservoir de stockage d'azote liquide.

[0062] La [Fig.5] illustre le système de refroidissement agencé dans un conteneur mobile 60 monté sur un camion. Le système de refroidissement peut être connecté à une source d'électricité 63 externe et à un réservoir extérieur 62 rempli d'un fluide cryogénique, par exemple de l'azote liquide. Ainsi, le système de refroidissement peut être conçu de manière moins encombrante et moins lourde qu'un système de refroidissement connu, et être alimenté par des sources d'électricité et de liquide cryogénique disponibles à l'endroit de son utilisation. Le système peut être utilisé pour la liquéfaction ou ré-liquéfaction d'hydrogène liquide dans un réservoir 61, ou pour toute autre application cryogénique.

[0063] Le tableau 1 illustre la consommation, la masse et le besoin en fluide cryogénique dans le cas de différents systèmes de refroidissement fournissant une puissance de 1kW à une température de 20K. On considère dans ce tableau uniquement la boucle principale du système de refroidissement, dans laquelle circule le gaz cryogénique, et non la boucle secondaire qui, dans l'invention, apporte la puissance de refroidissement requise pour l'échangeur thermique intermédiaire.

[0064]

1 kW à 20 K	Consommation de la boucle principale	Masse de la boucle principale	Masse de l'azote liquide équivalent pour fournir 5kW à 80K
Système de refroidissement turbo-Brayton connu	200 kW	1000 kg	

Système de refroidissement selon l'invention avec échangeur thermique intermédiaire de type turbo-Brayton apportant 5 kW à 80K	135 kW	580 kg	
Système de refroidissement selon l'invention avec échangeur thermique intermédiaire alimenté par azote liquide apportant 5 kW à 80K	60 kW	250 kg	~ 82 kg/hr

- [0065] Un système de refroidissement du type turbo-Brayton connu (première ligne du tableau) fournissant une telle puissance de 1kW à une température de 20K présente une masse de 1000 kg et une consommation électrique de 200 kW.
- [0066] Selon une première alternative procurée par l'invention (deuxième ligne du tableau), on peut obtenir la même puissance de refroidissement à une température de 20K en utilisant un système de refroidissement comprenant un échangeur thermique intermédiaire refroidi par une machine de type turbo-Brayton apportant une puissance de 5 kW à 80K. La consommation électrique de la boucle principale d'un tel système est de 135 kW et sa masse est d'environ 580 kg. L'ensemble constitué de la boucle principale et de la boucle secondaire présente une consommation électrique et une masse inférieures à celles du système connu. Il est ainsi possible de concevoir des systèmes plus légers, ce qui permet de les embarquer dans un aéronef et d'un véhicule et également d'économiser du carburant pour les applications à bord d'un aéronef ou véhicule.
- [0067] Selon une deuxième alternative procurée par l'invention (troisième ligne du tableau), on peut obtenir la même puissance de refroidissement de 1 kW à une température de 20K en utilisant un système de refroidissement comprenant un échangeur thermique intermédiaire refroidi par de l'azote liquide apportant une puissance de 5 kW à 80K. La consommation électrique de la boucle principale du système de refroidissement s'élève à 60 kW et la masse du système est de 250 kg. La consommation électrique de la boucle secondaire s'élève à 75 kW. L'ensemble constitué de la boucle principale et de la boucle secondaire présente une consommation électrique et une masse inférieures à celles du système connu. Pendant son fonctionnement, le système consomme en outre environ 82 kg d'azote liquide par heure. Par exemple, pour un vol d'une durée de 3 heures, cela correspond à une masse d'azote liquide de 246 kg, et une masse du

système de refroidissement comprenant cette quantité d'azote liquide de 446 kg. Pour des durées de vol plus courtes, le système nécessite une plus petite quantité de fluide de refroidissement tel que l'azote liquide et présente donc une masse et encombrement encore moins important. On peut ainsi concevoir des systèmes de refroidissement modulables, plus légers et plus compacts pour des durées de vol plus courtes.

- [0068] D'ailleurs, dans le cas d'une utilisation dans un véhicule ou aéronef, on peut agencer les radiateurs 1a et 1b en contact thermique avec l'environnement extérieur de l'aéronef, par exemple sur une paroi externe de l'aéronef en utilisant des éléments de fixation adaptés pour maintenir les radiateurs 1a et 1b sur une telle paroi pendant le vol. De manière alternative, les radiateurs 1a et 1b peuvent être agencés sur une paroi conductrice de chaleur en contact thermique avec l'environnement extérieur, ou en contact thermique en utilisant des fentes, grilles ou autres ouvertures permettant un échange avec l'air à l'extérieur du véhicule ou de l'aéronef.
- [0069] Ce mode de réalisation est très avantageux pour l'utilisation dans un aéronef se déplaçant en altitude. Par exemple, à une altitude de 10km du sol, la température à l'extérieur de l'aéronef peut baisser jusqu'à environ 220K. Passant d'une température ambiante autour de 300K à un environnement tel que l'extérieur d'un aéronef, les besoins en refroidissement pour obtenir la température intermédiaire diminuent. Pour les applications en aéronautique, le système de refroidissement selon l'invention permet donc d'avantage de gagner en masse et encombrement.
- [0070] Pour l'exemple d'un système de refroidissement fournissant une puissance de 1 kW à une température froide de 20K utilisant un échangeur thermique intermédiaire d'une puissance de 5kW à une température intermédiaire de 80K, une baisse de la température ambiante de 300 K au sol à 220 K à 10 km d'altitude engendre une baisse du besoin de refroidissement par l'échangeur thermique intermédiaire à 2,5 kW pour une température intermédiaire de 80K. Dans le cas où l'azote liquide est utilisé pour refroidir l'échangeur thermique intermédiaire, la consommation en azote liquide est réduite d'un facteur 2.
- [0071] D'ailleurs, les moteurs supraconducteurs pour aéronef sont généralement dimensionnés pour les phases de vol nécessitant une puissance maximale du moteur, en particulier la phase de décollage. Le refroidisseur cryogénique est alors dimensionné pour la puissance maximale du moteur. Lorsque l'aéronef est en phase de croisière ou en phase d'atterrissage, les puissances du moteur et du système de refroidissement cryogénique sont inférieures. On peut donc adapter le refroidissement fourni par l'échangeur thermique intermédiaire, et, le cas échéant, son besoin en fluide cryogénique. Une telle adaptation permet davantage de réduire la masse et l'encombrement du système de refroidissement en adaptant plus précisément la quantité de fluide servant au refroidissement intermédiaire

Revendications

- [Revendication 1] Système de refroidissement cryogénique comprenant :
- au moins un compresseur (1a, 2a) pour comprimer un gaz cryogénique et au moins un radiateur (1b, 2b) agencé en aval dudit compresseur pour refroidir le gaz cryogénique comprimé,
 - au moins un détendeur (4) pour détendre le gaz cryogénique comprimé,
 - un échangeur de chaleur (5) adapté pour être couplé à un appareil à refroidir par le gaz cryogénique détendu,
 - deux échangeurs récupérateurs (7, 8), adaptés pour un échange d'énergie thermique entre le gaz cryogénique comprimé en amont du détendeur (4) et le gaz cryogénique détendu en aval de l'échangeur de chaleur (5),
- caractérisé en ce qu'il comprend au moins un échangeur thermique intermédiaire (10), refroidi par un dispositif de refroidissement (14), et en ce que l'échangeur thermique intermédiaire (10) est agencé de sorte à refroidir le gaz cryogénique provenant du premier échangeur-récupérateur (7) avant le passage dudit gaz cryogénique dans le second échangeur-récupérateur, le détendeur (4) étant agencé en aval dudit second échangeur-récupérateur de sorte à refroidir ledit gaz à une température cryogénique.
- [Revendication 2] Système selon la revendication 1, dans lequel le dispositif de refroidissement comprend un fluide cryogénique assurant un échange thermique avec l'échangeur thermique intermédiaire (10).
- [Revendication 3] Système selon la revendication 2, dans lequel le fluide cryogénique est de l'azote ou du méthane.
- [Revendication 4] Système selon la revendication 1, dans lequel le dispositif de refroidissement comprend au moins un cryoréfrigérateur du type Turbo-Brayton, un cryoréfrigérateur basé sur le cycle Stirling ou un tube pulsé.
- [Revendication 5] Système selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'efficacité du premier échangeur récupérateur (7) est inférieure à l'efficacité du deuxième échangeur récupérateur (8).
- [Revendication 6] Système selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans

lequel l'échangeur de chaleur (5) est adapté pour refroidir un appareil à une température comprise entre 17 K et 50 K et plus avantageusement comprise entre 17 K et 20 K.

- [Revendication 7] Système selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les radiateurs (1b, 2b) comportent des éléments de fixation adaptés pour maintenir ledit échangeur de chaleur (5) sur une paroi extérieure d'un aéronef ou sont thermiquement connectés à une structure refroidie par l'environnement externe dudit aéronef.
- [Revendication 8] Véhicule ou aéronef à propulsion électrique utilisant au moins un élément supraconducteur comprenant un système de refroidissement cryogénique selon l'une des revendications précédentes, ledit système de refroidissement étant agencé de sorte à coupler thermiquement l'échangeur de chaleur (5) à l'au moins un élément supraconducteur à refroidir.
- [Revendication 9] Véhicule ou aéronef selon la revendication 8, dans lequel les radiateurs (1b, 2b) sont agencés sur une paroi extérieure dudit véhicule ou aéronef ou en échange thermique avec l'environnement externe dudit véhicule ou aéronef.
- [Revendication 10] Véhicule ou aéronef selon l'une des revendications 8-9, comprenant un connecteur fluide apte à connecter fluidiquement la source froide à une source de fluide cryogénique pour refroidir l'échangeur thermique à une température cryogénique.
- [Revendication 11] Véhicule ou aéronef selon l'une des revendications 8-10, comprenant un réservoir de fluide cryogénique agencé dans ledit véhicule ou aéronef, ledit fluide cryogénique étant en liaison fluide avec l'échangeur thermique intermédiaire (10) pour refroidir ledit échangeur thermique à une température cryogénique.
- [Revendication 12] Installation de liquéfaction d'hydrogène, comprenant un véhicule, un conteneur ou un aéronef, un système de refroidissement cryogénique selon l'une des revendications 1-7 agencé dans ledit véhicule, conteneur ou aéronef, ladite installation étant agencée de sorte à coupler thermiquement l'échangeur de chaleur à une source d'hydrogène à liquéfier ou en élément supraconducteur.
- [Revendication 13] Installation de liquéfaction d'hydrogène selon la revendication 12, comprenant un réservoir de fluide cryogénique agencé dans ledit véhicule ou conteneur ou aéronef, ledit réservoir étant en liaison fluide avec l'échangeur thermique intermédiaire (10) pour refroidir ledit échangeur thermique intermédiaire (10) à une température

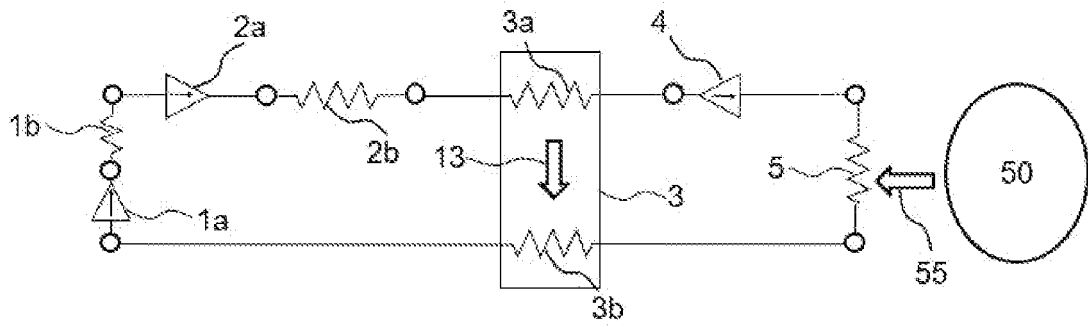
cryogénique grâce au fluide cryogénique.

[Revendication 14] Installation de liquéfaction d'hydrogène selon la revendication 12, comprenant un connecteur adapté pour établir une liaison fluide entre l'échangeur thermique intermédiaire (10) et un réservoir de fluide cryogénique à l'extérieur dudit véhicule, conteneur ou aéronef, pour refroidir ledit échangeur thermique intermédiaire (10) à une température cryogénique.

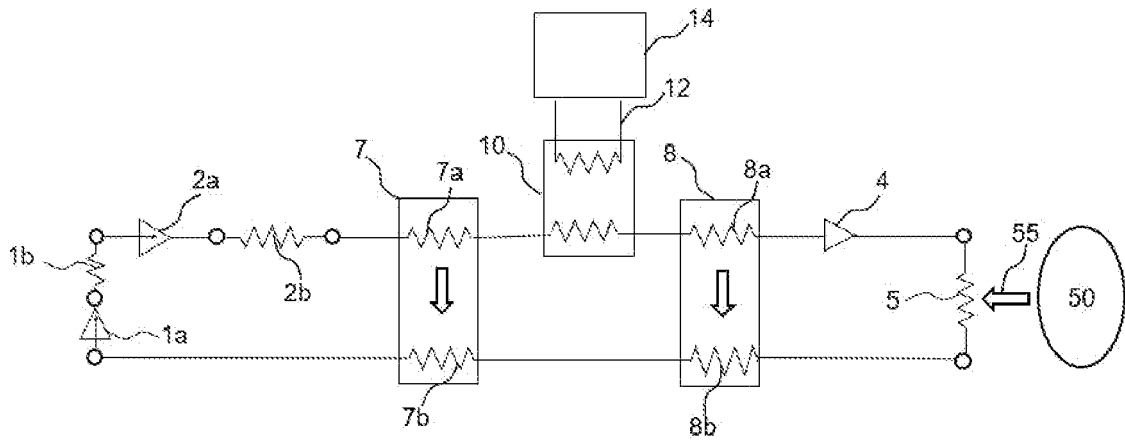
[Revendication 15] Procédé de refroidissement cryogénique, comprenant les étapes suivantes :

- une ou plusieurs étapes de compression d'un gaz cryogénique dans un compresseur (1a, 2a) et une étape de refroidissement dudit gaz comprimé par un radiateur (1b, 2b) après chaque étape de compression,
- le passage dudit gaz dans un premier échangeur-récupérateur (7) de sorte à refroidir le gaz comprimé à une première température (T_1),
- le passage du gaz en aval du premier échangeur-récupérateur (7) dans un échangeur thermique (10) intermédiaire, refroidi par un dispositif de refroidissement (14), de sorte à refroidir le gaz provenant du premier échangeur-récupérateur à une température intermédiaire (T_i) inférieure à la première température (T_1),
- le passage dudit gaz en aval de l'échangeur intermédiaire (10) dans un second échangeur-récupérateur (8), de sorte à refroidir le gaz provenant de l'échangeur thermique (10) intermédiaire à une seconde température (T_2) inférieure à la température intermédiaire (T_i),
- l'expansion dudit gaz dans un organe de détente (4) de sorte à refroidir ledit gaz à une température cryogénique (T_c) inférieure à la seconde température (T_2),
- l'utilisation dudit gaz pour le refroidissement d'un appareil (50) à refroidir,
- le passage dudit gaz en aval de l'appareil à refroidir (50) dans le second échangeur-récupérateur (8) et le premier échangeur-récupérateur (7) en récupérant l'énergie thermique du gaz comprimé dans le circuit.

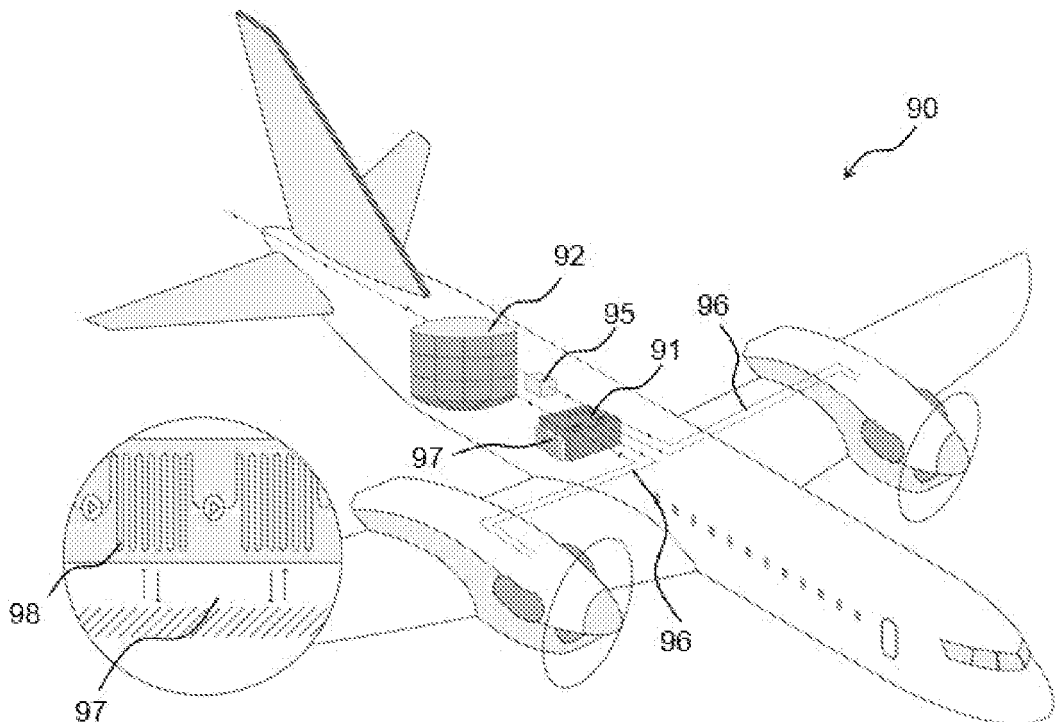
[Fig. 1]



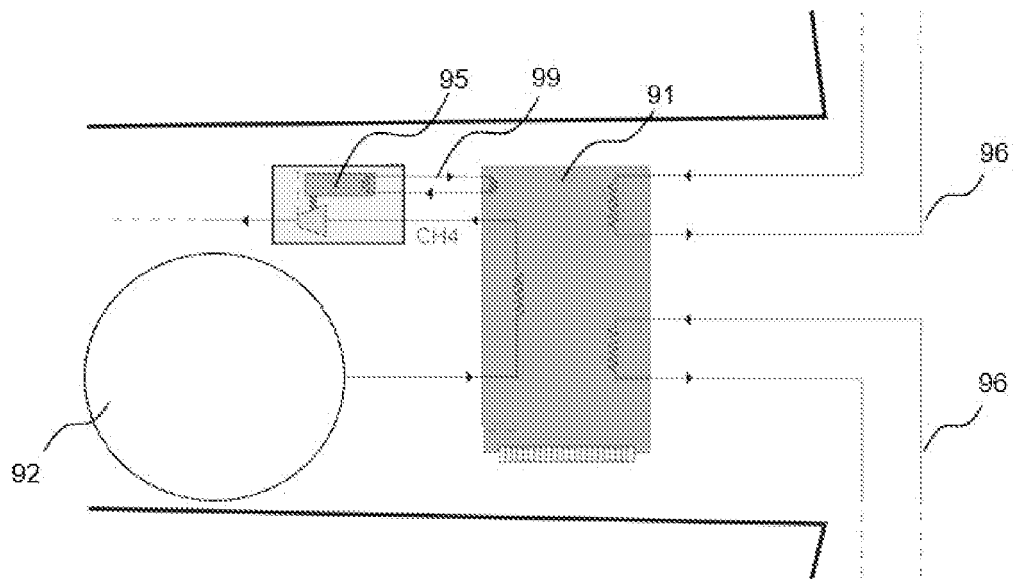
[Fig. 2]



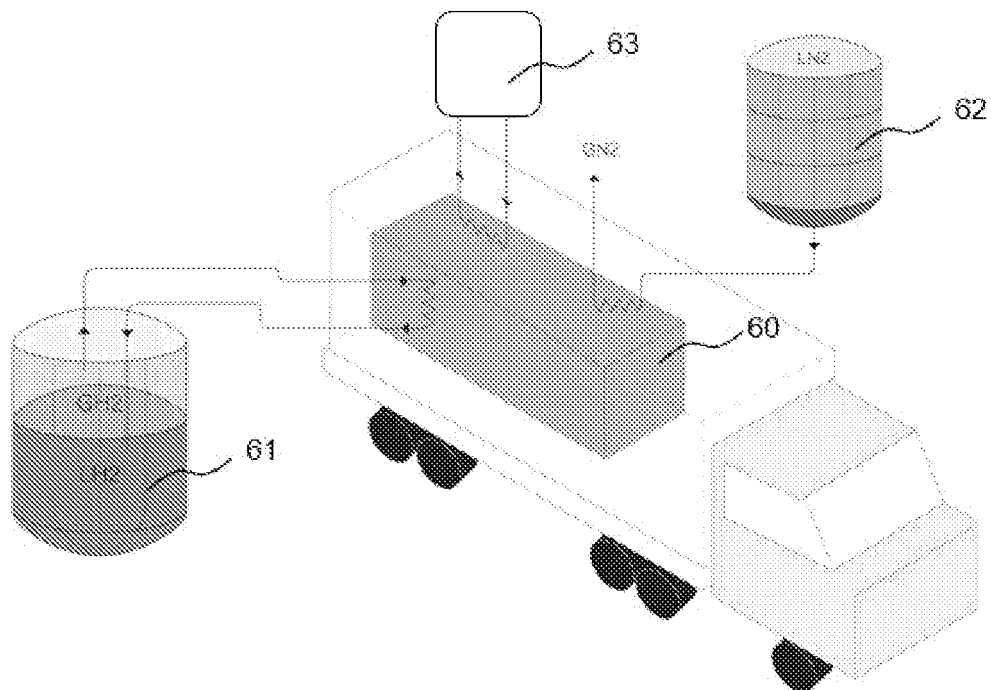
[Fig. 3]



[Fig. 4]



[Fig. 5]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 905638
FR 2201706

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 6 463 744 B1 (ALEXEEV ALEXANDER [DE] ET AL) 15 octobre 2002 (2002-10-15)	1-3,15	F25B9/00 F25B9/10
A	* colonne 1, ligne 4 - colonne 6, ligne 12; figures 1-4 *	9-11	

X	US 9 261 295 B1 (SCHMIDT JEFFREY A [US] ET AL) 16 février 2016 (2016-02-16)	1-8, 12-15	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) F25B F25D F02G F25J
A	* colonne 1, ligne 46 - colonne 10, ligne 64; figures 1-5 *	9-11	

A	US 2005/016187 A1 (KUDARAVALLI RAVIKUMAR [US]) 27 janvier 2005 (2005-01-27)	1-15	
	* le document en entier *		

Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
20 septembre 2022		Lucic, Anita	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2201706 FA 905638**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **20-09-2022**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication	
US 6463744	B1	15-10-2002	AT 216481 T	15-05-2002
			EP 1078208 A1	28-02-2001
			JP 2002514734 A	21-05-2002
			PE 20000391 A1	24-05-2000
			US 6463744 B1	15-10-2002
			WO 9958905 A1	18-11-1999

US 9261295	B1	16-02-2016	AUCUN	

US 2005016187	A1	27-01-2005	AU 2004202906 A1	20-01-2005
			CN 1575746 A	09-02-2005
			JP 4572404 B2	04-11-2010
			JP 2005028132 A	03-02-2005
			US 2005016187 A1	27-01-2005
