

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 08.07.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 12.01.24 Bulletin 24/02.

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) : L'AIR LIQUIDE, SOCIETE ANONYME
POUR L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DES PRO-
CEDES GEORGES CLAUDE SOCIETE ANONYME —
FR.

72 Inventeur(s) : BARJHOUX Pierre, AYRAULT Laura
et ROIG Mathieu.

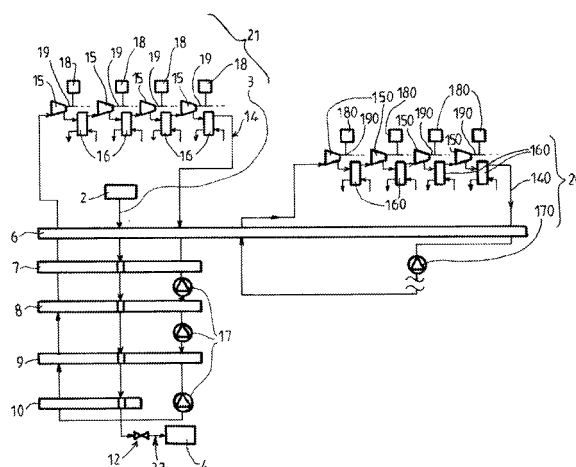
73 Titulaire(s) : L'AIR LIQUIDE, SOCIETE ANONYME
POUR L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DES PRO-
CEDES GEORGES CLAUDE SOCIETE ANONYME.

74 Mandataire(s) : L'AIR LIQUIDE, SOCIETE ANO-
NYME.

54 Dispositif et procédé de liquéfaction d'un fluide.

57 L'invention concerne un dispositif de liquéfaction d'un fluide tel que l'hydrogène comprenant un système (20) de pré-refroidissement en échange thermique avec au moins une partie d'un ensemble d'échangeur(s) (6) de chaleur configuré pour abaisser la température du fluide à refroidir à une première température et un système (21) de refroidissement en échange thermique avec au moins une partie de l'ensemble d'échangeur(s) (6, 7, 8, 9, 10) de chaleur dans lequel le système (21) de refroidissement et le système de pré-refroidissement comprennent chacun un réfrigérateur (21, 20) à cycle de réfrigération d'un gaz de cycle comprenant, dans un circuit (14, 140) de cycle: un mécanisme (15, 150) de compression, un mécanisme (17, 170) de détente le mécanisme de compression comprenant un ensemble de compresseur(s) (15, 150) de type centrifuge montés sur des arbres (19, 190) entraînés en rotation par un ensemble de moteur(s) (18, 180), le mécanisme de détente comprenant au moins une des turbines (17, 170) accouplée au même arbre (19) qu'au moins un étage de compression (15).

Figure d'abrégé: Fig. 1



Description

Titre de l'invention : Dispositif et procédé de liquéfaction d'un fluide.

- [0001] L'invention concerne un dispositif et un procédé de liquéfaction d'un fluide tel que l'hydrogène et/ou l'hélium.
- [0002] L'invention concerne plus particulièrement un dispositif de liquéfaction d'un fluide tel que l'hydrogène et/ou l'hélium comprenant un circuit de fluide à refroidir ayant une extrémité amont destinée à être reliée à une source de fluide gazeux et une extrémité aval destinée à être reliée à un organe de collecte du fluide liquéfié, le dispositif comprenant un ensemble d'échangeur(s) de chaleur en échange thermique avec le circuit (3) de fluide à refroidir, le dispositif comprenant un système de pré-refroidissement en échange thermique avec au moins une partie de l'ensemble d'échangeur(s) de chaleur configuré pour abaisser la température du fluide à refroidir à une première température, par exemple comprise 30 et 110K, le dispositif comprenant en outre un système de refroidissement en échange thermique avec au moins une partie de l'ensemble d'échangeur(s) de chaleur et configuré pour abaisser la température du fluide à refroidir de la première température à une seconde température, par exemple comprise entre 15 et 25K, dans lequel le système de refroidissement comprend un premier réfrigérateur à cycle de réfrigération d'un premier gaz de cycle comprenant de l'hélium et/ou de l'hydrogène, ledit premier réfrigérateur comprenant, disposés en série dans un circuit de cycle : un mécanisme de compression du gaz de cycle, au moins un organe de refroidissement du gaz de cycle, un mécanisme de détente du gaz de cycle et au moins un organe de réchauffage du gaz de cycle détendu, dans lequel le mécanisme de compression comprend plusieurs étages de compression en série composés d'un ensemble de compresseur(s) de type centrifuge, les étages de compressions étant monté sur des arbres entraînés en rotation par un ensemble de moteur(s), le mécanisme de détente comprenant plusieurs étages de détente composés d'un ensemble de turbines de type centripète.
- [0003] Les dispositifs de liquéfaction de fluides cryogéniques, notamment d'hydrogène comprennent généralement un système de pré-refroidissement au moyen d'une source froide telle qu'une réserve d'azote liquide ou un réfrigérateur à cycle fermé ou semi-fermé d'azote.
- [0004] La pression la plus basse du cycle de pré-refroidissement détermine la température la plus basse qu'atteint le gaz de cycle de pré-refroidissement (température de coupure). Ainsi, cette pression basse du cycle de pré-refroidissement est imposée à une valeur la plus basse possible, pour abaisser la température de coupure au bout froid de ce cycle

de pré-refroidissement et ainsi pré-refroidir efficacement le débit de gaz à liquéfier avant que celui-ci n'échange thermiquement avec le gaz de cycle du réfrigérateur qui abaisse la température jusqu'à une température de liquéfaction.

- [0005] Cette architecture utilise généralement des stations de compression multi-étagées comportant une roue à engrenage ou dispositif d'augmentation de vitesse entre la vitesse fournie par le moteur électrique typiquement à 50 ou 60Hz et les arbres tournants, portant les multiples étages de compression, qui eux nécessitent pour des aspects d'efficacité énergétique une vitesse de rotation d'arbre bien élevée. Cette architecture ne permet pas une grande capacité de flexibilité dans le processus de liquéfaction comme décrit ci-dessous.
- [0006] Une solution connue consiste à utiliser la technologie dite « IGV » mobiles (« Inlet Guide Vanes » Vannes Guide d'Entrée) qui permet de faire varier les débits de gaz à l'aspiration typiquement du premier étage de compression du cycle qui comporte ces IGV. Généralement, cette technologie n'est installée qu'en entrée du premier étage de compression du cycle de réfrigération concerné pour des aspects de coûts et de limitation d'organes mobiles pouvant générer une potentielle défaillance sur l'usine complète. Cette solution n'est que partiellement satisfaisante. En particulier, l'efficacité globale et le rendement de l'installation ne sont pas satisfaisants. En particulier, cette solution ne permet pas d'adapter l'installation aux énergies intermittentes ou alors avec un rendement peu satisfaisant.
- [0007] Une autre solution consiste à utiliser un cycle de réfrigération utilisant des mélanges de réfrigérants (« MR »). Cependant ces solutions fournissent une température de coupure plus élevée (mélange de constituants de type hydrocarbures et azote dont le mélange induit des températures de coupure de 20 à 50 degrés plus élevé que les cycles de pré-refroidissement à azote pur) qui contraint plus le cycle de refroidissement final d'un point de vue thermodynamique. De plus, en cas de fuite le mélange à reconstituer est complexe pour les opérateurs (nécessité de déterminer le ou les composants qui fuient préférentiellement et de réajuster le mélange étape par étape). Si la température de coupure de ce cycle est abaissée (en ajoutant typiquement de l'azote dans le mélange en plus grandes proportions), le rendement de ce procédé chute significativement (de l'ordre de 10% si la température de coupure est abaissée de 5K). Un but de la présente invention est de pallier tout ou partie des inconvénients de l'art antérieur relevés ci-dessus.
- [0008] A cette fin, le dispositif selon l'invention, par ailleurs conforme à la définition générique qu'en donne le préambule ci-dessus, est essentiellement caractérisé en ce que au moins une des turbines est accouplée au même arbre qu'au moins un étage de compression de façon à fournir à l'étage de compression du travail mécanique produit lors de la détente et en ce que le système de pré-refroidissement comprend un second

réfrigérateur à cycle de réfrigération d'un second gaz de cycle, ledit le second réfrigérateur comprenant, disposés en série dans un circuit de cycle : un mécanisme de compression du gaz de cycle, au moins un organe de refroidissement du gaz de cycle, un mécanisme de détente du gaz de cycle et au moins un organe de réchauffage du gaz de cycle détendu, dans lequel le mécanisme de compression comprend plusieurs étages de compression en série composés d'un ensemble de compresseur(s) de type centrifuge, les étages de compressions étant monté sur des arbres entraînés en rotation par un ensemble de moteur(s), le mécanisme de détente comprenant un ou plusieurs étages de détente composés d'un ensemble de turbine(s) de type centripète dont au moins une est accouplée au même arbre qu'au moins un étage de compression de façon à fournir à l'étage de compression du travail mécanique produit lors de la détente.

[0009] Par ailleurs, des modes de réalisation de l'invention peuvent comporter l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- le gaz de cycle du second réfrigérateur comprend au moins l'un parmi : de l'azote, du néon, de l'hélium, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'argon ou du dioxyde de carbone,
- le premier réfrigérateur et le second réfrigérateur comportent des moteurs respectifs de même type et/ou des compresseurs respectifs de même type, et/ou des turbines respectives de même type,
- le premier réfrigérateur et le second réfrigérateur comportent au moins un moteur commun dont l'arbre est accouplé à un ou des compresseurs et/ou une ou des turbines du premier réfrigérateur et accouplé également à un ou des compresseurs du second réfrigérateur et/ou une ou des turbines du second réfrigérateur,
- l'ensemble de moteur(s) du premier et/ou du second réfrigérateur comprend au moins un moteur électrique à vitesse variable pilotée par un signal électrique, par exemple par variation de fréquence,
- l'ensemble de moteur(s) du second réfrigérateur comprend au moins un moteur électrique à vitesse variable pilotée par un signal électrique, par exemple par variation de fréquence et en ce que la puissance froide fournie par le second réfrigérateur détermine la première température et est fonction de la vitesse de rotation dudit au moins moteur,
- l'ensemble de moteur(s) du premier réfrigérateur comprend au moins un moteur électrique à vitesse variable pilotée par un signal électrique, par exemple par variation de fréquence et en ce que la puissance froide fournie par le premier réfrigérateur détermine la seconde température et est fonction de la vitesse de rotation dudit au moins un moteur,
- le dispositif comporte un organe électronique de commande d'au moins un

- moteur(s) du premier réfrigérateur et d'au moins un moteur du second réfrigérateur, l'organe de commande étant configuré pour piloter de façon conjointe la consigne de vitesse des moteurs des premier et second réfrigérateurs,
- l'organe de commande est configuré pour augmenter ou diminuer de façon identique en pourcentages les consignes de vitesse des moteurs des premier et second réfrigérateurs.
- [0010] L'invention concerne également un procédé de liquéfaction d'un fluide tel que l'hydrogène et/ou l'hélium utilisant un dispositif selon l'une quelconque des caractéristiques ci-dessus ou ci-dessous, le procédé comprenant une étape de refroidissement du fluide à refroidir à la première température, par exemple comprise entre 30 et 110K via le second réfrigérateur puis une étape de refroidissement du fluide à refroidir de la première température à la seconde température par exemple comprise entre 15 et 25K.
- [0011] Selon d'autres particularités possibles :
- le procédé comporte une étape de contrôle de la valeur de la première température via le pilotage de la vitesse d'au moins un des moteurs de l'ensemble de moteur(s) du second réfrigérateur,
 - les circuits de cycle du premier réfrigérateur et du second réfrigérateur contiennent le même gaz de cycle et sont interconnectés via au moins une vanne.
- [0012] L'invention peut concerner également tout dispositif ou procédé alternatif comprenant toute combinaison des caractéristiques ci-dessus ou ci-dessous dans le cadre des revendications.
- [0013] D'autres particularités et avantages apparaîtront à la lecture de la description ci-après, faite en référence aux figures dans lesquelles :

Brève description des figures

- [0014] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins annexés dans lesquels :
- [0015] [Fig.1] est une vue partielle et schématique illustrant un exemple de structure et de fonctionnement d'un exemple de dispositif de liquéfaction selon l'invention,
- [0016] [Fig.2] est une vue schématique et partielle d'un détail d'un tel dispositif dans une variante de réalisation,
- [0017] [Fig.3] est une vue schématique et partielle d'un autre détail d'un tel dispositif dans une autre variante de réalisation.

Description détaillée

- [0018] Sur toutes les figures, les mêmes références se rapportent aux mêmes éléments.
- [0019] Dans cette description détaillée, les réalisations suivantes sont des exemples. Bien

que la description se réfère à un ou plusieurs modes de réalisation, cela ne signifie pas que les caractéristiques s'appliquent seulement à un seul mode de réalisation. De simples caractéristiques de différents modes de réalisation peuvent également être combinées et/ou interchangées pour fournir d'autres réalisations.

- [0020] Le dispositif 1 de liquéfaction d'un fluide tel que l'hydrogène et/ou l'hélium illustré à la [Fig.1] comprend un circuit 3 de fluide à refroidir ayant une extrémité amont destinée à être reliée à une source 2 de fluide gazeux et une extrémité aval 23 destinée à être reliée à un organe 4 de collecte du fluide liquéfié.
- [0021] La source 2 peut comprendre une unité distribution (réseau) et/ou de production de gaz (par exemple de l'hydrogène). La source 2 peut comprendre en particulier un électrolyseur ou une unité de vapo-reformage.
- [0022] L'organe 4 de collecte peut comprendre, par exemple, au moins un stockage de liquide cryogénique. En amont du stockage 4 le circuit 3 de fluide à refroidir comporte de préférence une vanne, par exemple une vanne 12 de détente et/ou une turbine de détente.
- [0023] Le dispositif 1 de liquéfaction comprend un ensemble d'échangeur(s) 6, 7, 8, 9, 10 de chaleur disposés en série et/ou en parallèle en échange thermique avec le circuit 3 de fluide à refroidir et un système 20 de pré-refroidissement en échange thermique avec au moins une partie de l'ensemble d'échangeur(s) 6 de chaleur.
- [0024] Ce système de pré-refroidissement est typiquement configuré pour abaisser la température du fluide à refroidir à une première température, par exemple comprise entre 30 et 110K, par exemple 80K.
- [0025] Le dispositif 1 de liquéfaction comprend en outre un système 21 de refroidissement en échange thermique avec au moins une partie de l'ensemble d'échangeur(s) 6, 7, 8, 9, 10 de chaleur.
- [0026] Ce système de refroidissement est quant à lui configuré pour abaisser encore la température du fluide à refroidir de la première température à une seconde température, par exemple comprise entre 15 et 25K, par exemple 20K pour permettre sa liquéfaction.
- [0027] Comme illustré, le système de refroidissement comprend un premier réfrigérateur 21 à cycle de réfrigération d'un premier gaz de cycle comprenant de l'hélium et/ou de l'hydrogène. Ce premier réfrigérateur 21 comprend, disposés en série dans un circuit 14 de cycle : un mécanisme 15 de compression du gaz de cycle, au moins un organe de refroidissement du gaz de cycle, un mécanisme 17 de détente du gaz de cycle et au moins un organe de réchauffage du gaz de cycle détendu.
- [0028] C'est-à-dire que le premier réfrigérateur 21 soumet le gaz de cycle à un cycle thermodynamique dans lequel le gaz de cycle atteint à une extrémité froide une température très basse (cryogénique) constituant une puissance froide et qui est mise en

échange thermique avec le fluide à liquéfier.

- [0029] Le fluide à liquéfier (exemple l'hydrogène) est un fluide qui est de préférence distinct du fluide du gaz de cycle (exemple hélium et éventuellement autre(s) composant(s)).
- [0030] De préférence ces deux circuits sont donc distincts.
- [0031] Comme illustré, l'ensemble d'échangeur(s) de chaleur qui refroidit le fluide à liquéfier comprend de préférence un ou plusieurs échangeurs de chaleur 6, 7, 8, 9 à contre-courant disposés en série et dans lesquels deux portions distinctes du circuit 14 de cycle circulent simultanément à contre-courant (respectivement pour le refroidissement et le réchauffage de flux distincts du gaz de cycle).
- [0032] C'est-à-dire que cette pluralité d'échangeurs de chaleur à contre-courant forme à la fois un organe de refroidissement du gaz de cycle (après la compression et après un ou des étages de détente par exemple) et un organe de réchauffage du gaz de cycle (après la détente et avant le retour dans le mécanisme de compression).
- [0033] Le mécanisme de compression comprend plusieurs étages de compression 15 en série composés d'un ensemble de compresseur(s) 15 de type centrifuge. Par exemple, le mécanisme de compression comprend au moins quatre étages 15 de compression composés d'un ensemble de compresseurs de type centrifuge disposés en série (et éventuellement en parallèle).
- [0034] Un étage 15 de compression peut être composé d'une roue d'un compresseur centrifuge motorisé.
- [0035] Les étages de compression 15 (c'est-à-dire les roues de compresseurs) sont montés sur des arbres 19 entraînés en rotation par un ensemble de moteur(s) 18 (au moins un moteur).
- [0036] De préférence, tous les compresseurs 15 sont de type centrifuge.
- [0037] Le mécanisme de détente comprend de préférence plusieurs étages de détente composés d'un ensemble de turbine(s) 17 de type centripète, dans lequel au moins une des turbines 17 est accouplée au même arbre 19 qu'au moins un étage de compression 15 de façon à fournir à l'étage de compression 15 du travail mécanique produit lors de la détente. Par exemple, le mécanisme de détente comprend trois ou plus étages de détente formés de turbines 17 de type centripète disposées au moins en partie en série.
- [0038] De préférence, le nombre d'étages de compression (par exemple le nombre de roues de compression) est supérieur au nombre d'étages de détente (par exemple nombre de roues de détente). De préférence, toutes les turbines 17 sont de type centripète et sont majoritairement disposées en série.
- [0039] Le dispositif 1 peut comporter un organe 8, 9 de refroidissement du gaz de cycle configuré pour refroidir le gaz de cycle à la sortie de l'une au moins des turbines 17. C'est-à-dire que, après détente dans une turbine 17, le gaz de cycle peut être refroidi d'une valeur typiquement comprise entre 2K et 30K.

- [0040] De plus, au moins une des turbines 17 est accouplée au même arbre 19 qu'un étage de compression 15 d'un compresseur de façon à fournir au compresseur du travail mécanique produit lors de la détente.
- [0041] Cette architecture permet de dé-corréler (rendre indépendant) le procédé à fluide caloporteur (gaz de cycle à base d'hélium par exemple) de la température de livraison du fluide à liquéfier (hydrogène par exemple). Ceci permet en particulier, dans le circuit 14 de cycle, d'augmenter la valeur du niveau de basse pression du gaz de cycle à des pressions qui sont plus élevées que dans les dispositifs connus. Ceci est possible malgré un taux de compression global du gaz de cycle relativement faible. Cette technologie de compression centrifuge n'était généralement pas recommandée pour la liquéfaction d'hydrogène dans l'art antérieur du fait de la limitation du taux de compression par étage.
- [0042] Ainsi, le dispositif 1 peut comporter un ou plusieurs Moto-Turbo-Compresseurs sur une partie de la station de compression. Un Moto-Turbo-Compresseurs est un ensemble comprenant un moteur dont l'arbre entraîne directement un ensemble d'étage(s) de compression (roue(s)) et un ensemble d'étage(s) de détente (turbine(s)). Ceci valorise du travail mécanique de détente directement sur un ou des compresseurs 15 du gaz de cycle.
- [0043] Le système 21 de pré-refroidissement comprend un second réfrigérateur 20 à cycle de réfrigération d'un second gaz de cycle. Ce second réfrigérateur 20 comprend lui aussi, disposés en série dans un circuit 140 de cycle : un mécanisme 150 de compression du gaz de cycle, au moins un organe 160 de refroidissement du gaz de cycle, un mécanisme 170 de détente du gaz de cycle et au moins un organe 6 de réchauffage du gaz de cycle détendu.
- [0044] Le mécanisme de compression comprend plusieurs étages de compression 150 en série composés d'un ensemble de compresseur(s) 150 de type centrifuge. Les étages de compressions 150 sont montés sur des arbres 190 entraînés en rotation par un ensemble de moteur(s) 180.
- [0045] Le mécanisme de détente comprenant un ou plusieurs étages de détente composés d'un ensemble de turbine(s) 170 de type centripète.
- [0046] Comme pour le premier réfrigérateur, au moins une des turbines 170 est accouplée au même arbre 190 qu'au moins un étage de compression 150 de façon à fournir à l'étage de compression 150 du travail mécanique produit lors de la détente.
- [0047] C'est-à-dire que les premier 21 et second 20 réfrigérateurs ont de préférence la même structure générale et technologie.
- [0048] Cette architecture de système 20 de pré-refroidissement permet d'abaisser la température de coupure du système 20 de pré-refroidissement par rapport aux dispositifs connus et offre une flexibilité améliorée.

- [0049] Le gaz de cycle du second réfrigérateur 20 peut comprendre au moins l'un parmi : de l'azote, du néon, de l'hélium, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'argon ou du dioxyde de carbone. De préférence le gaz de cycle de ce second réfrigérateur assurant le pré-refroidissement est composé d'un mélange d'hélium et néon ou hélium et azote par exemple. De préférence le dispositif n'utilise que des gaz rares et/ou inertes dans les cycles.
- [0050] Ceci permet d'atteindre des températures plus basses dans le système de pré-refroidissement (typiquement sous 80K) sans nuire au rendement global et sans risquer de condenser ou même geler un constituant qui aurait un impact dramatique sur les turbomachines et échangeurs du circuit.
- [0051] Comme illustré, au moins un échangeur 6 peut être commun aux flux suivants : circuit 3 de fluide à refroidir, circuit 14 du premier réfrigérateur (notamment deux flux : après et avant compression) et circuit 140 du second réfrigérateur (par exemple deux flux : avant et après détente).
- [0052] Comme mentionné ci-dessus, les premier 21 et second 20 réfrigérateurs ont de préférence la même structure générale et la même technologie. En particulier, ces deux réfrigérateurs 20, 21 comportent de préférence des composants de même nature ou identiques. Par « identiques » ou « de même nature » on désigne des composants (moteur, roue de turbine, roue de compresseur, paliers, carter...) de même technologie mais pas forcément strictement identiques. Par exemple, les composants de même nature peuvent être de tailles différentes.
- [0053] Ainsi, le premier réfrigérateur 21 et le second réfrigérateur 20 comportent par exemple des moteurs respectifs de même type et/ou des compresseurs respectifs de même type, et/ou des turbines respectives de même type et/ou des paliers du même type (magnétique ou à gaz).
- [0054] Les deux cycles 14, 140 comprennent par exemple des turbines centripètes et compresseurs centrifuges couplés sur de mêmes arbres. Ces composants de même nature permettent une mutualisation de composants ou de sous-composants : par exemple mêmes moteurs électriques, même chaîne électrotechnique pour les moto-compresseurs et moto-turbo-compresseurs, mêmes roues, mêmes dimensions, mêmes conceptions...Ceci permet de mutualiser les approvisionnements et de réduire notamment les références de composants ou d'organes du dispositif 1 (exemple : moteur, paliers sur l'ensemble de l'unité de liquéfaction...).
- [0055] Ceci permet d'utiliser dans le même dispositif 1 (même installation) des machines d'un seul type aussi bien pour le pré-refroidissement (de 300K à 80K par exemple) que le refroidissement entre 80 et 20K par exemple). Par exemple seules les turbines seraient différentes.
- [0056] Les composants cryogéniques peuvent être logés dans des boîtes froides isolées ther-

miquement (de préférence sous vide) distinctes ou dans une même boîte froide (par exemple avec des volumes séparés indépendants ou non).

- [0057] De plus, et comme schématisé à la [Fig.2], le premier réfrigérateur 21 et le second réfrigérateur 20 peuvent comporter un moteur 18, 180 commun à l'arbre 19, 190 rotatif duquel sont accouplés des roues des deux réfrigérateurs 20, 21. Par exemple l'arbre 19, 190 d'un moteur 18, 180 est accouplé à au moins une roue de compresseur 15 et/ou de turbine 17 du premier 21 réfrigérateur et également accouplé à au moins une roue de compresseur 150 et/ou une roue de turbine 170 du second 20 réfrigérateur.
- [0058] De même, des moteurs des deux réfrigérateurs 20, 21 peuvent partager des composants communs, par exemple la même circuiterie de puissance et/ou un même variateur électronique de vitesse (« VFD »).
- [0059] De préférence, au moins une partie de l'ensemble de moteur(s) 18, 180 du premier et/ou du second réfrigérateur 21, 20 sont des moteurs électriques à vitesse variable pilotée par un signal électrique, par exemple par variation de fréquence.
- [0060] De plus, la puissance froide fournie par chaque réfrigérateur 20, 21 est de préférence fonction de la vitesse de rotation du ou des moteurs, par exemple la puissance froide fournie est proportionnelle à la vitesse de rotation des moteurs.
- [0061] En particulier, la vitesse de rotation du ou des moteurs 180 du second réfrigérateur 20 conditionne la température la plus basse fournie par le second réfrigérateur 20 (température de coupure). Ceci détermine la seconde température dans le processus de refroidissement et de liquéfaction du fluide à liquéfier.
- [0062] Comme schématisé à la [Fig.3], le dispositif 1 comporte de préférence un organe 11 électronique de commande d'au moins un moteur(s) 18, 180. L'organe 11 électronique comprend par exemple un microprocesseur ou ordinateur ou tout autre système approprié.
- [0063] Comme illustré, l'organe 11 électronique peut commander au moins un moteur(s) 18 du premier réfrigérateur 21 et au moins un moteur 180 du second réfrigérateur 20. Cet organe 11 de commande peut en particulier être configuré pour piloter de façon conjointe la consigne de vitesse des moteurs des premier et second réfrigérateurs 20, 21. C'est-à-dire que la commande d'un des réfrigérateurs 20 ou 21 détermine (est dépendante) de la commande de l'autre réfrigérateur 21 ou 20.
- [0064] Par exemple, l'organe 11 de commande peut être configuré pour augmenter ou diminuer de façon identique (en pourcentage) les consignes de vitesse des moteurs 18, 180 des premier 21 et second 20 réfrigérateurs.
- [0065] Par exemple, les conditions de température du fluide liquéfié peuvent être contrôlées via la vitesse des moteurs 18, 180. Ainsi, par exemple s'il faut baisser (ou augmenter) de 30% la vitesse des moteurs du premier réfrigérateur 21, la vitesse des moteurs 20 du second réfrigérateur est baissée (ou augmentée) également de 30%. Ceci peut être

réalisé via une seule consigne de commande (un signal identique ou unique).

[0066] De préférence, le cycle de pré-refroidissement est fermé et le cycle de refroidissement est également fermé.

[0067] Dans une variante possible, les deux cycles pourraient être connectés via une vanne d'équilibrage (et un système de pilotage de la vanne). Ceci permet de répartir les puissances froides produites par les deux réfrigérateurs 20, 21 sans changer la vitesse des moteurs correspondants.

[0068] Le dispositif 1 présente une grande flexibilité pour piloter les puissances froides des systèmes de pré-refroidissement 20 et de refroidissement 21.

[0069] Ainsi il est possible de contrôler et fixer les températures à la jonction entre les deux réfrigérateurs dans le circuit 3 de fluide à liquéfier.

[0070] Le dispositif 1 permet en outre d'augmenter la capacité de production de froid au niveau du refroidissement en gardant la même architecture, c'est-à-dire un gaz liquéfié à plus basse température qu'au point de fonctionnement nominal. En effet, il est possible d'abaisser ponctuellement la température de coupure du système de pré-refroidissement. Ceci permet de réduire la charge thermique pour le système de refroidissement et donc de sous-refroidir davantage le fluide liquéfié en sortie de liquéfacteur. La modification de la température de coupure est possible sur une plus grande plage de températures.

Revendications

[Revendication 1]

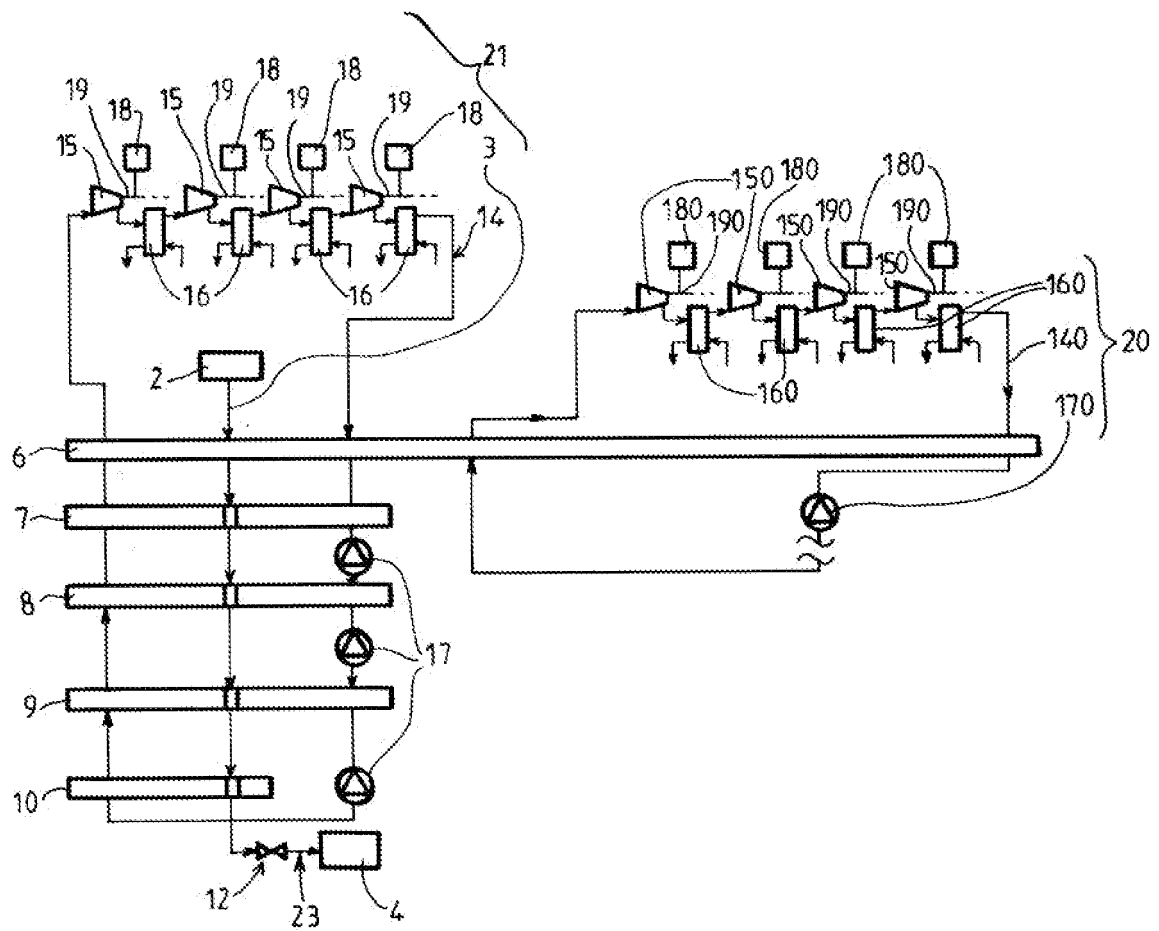
Dispositif de liquéfaction d'un fluide tel que l'hydrogène et/ou l'hélium comprenant un circuit (3) de fluide à refroidir ayant une extrémité amont destinée à être reliée à une source (2) de fluide gazeux et une extrémité aval (23) destinée à être reliée à un organe (4) de collecte du fluide liquéfié, le dispositif (1) comprenant un ensemble d'échangeur(s) (6, 7, 8, 9, 10) de chaleur en échange thermique avec le circuit (3) de fluide à refroidir, le dispositif (1) comprenant un système (20) de pré-refroidissement en échange thermique avec au moins une partie de l'ensemble d'échangeur(s) (6) de chaleur configuré pour abaisser la température du fluide à refroidir à une première température, par exemple comprise entre 30 et 110K, le dispositif (1) comprenant en outre un système (21) de refroidissement en échange thermique avec au moins une partie de l'ensemble d'échangeur(s) (6, 7, 8, 9, 10) de chaleur et configuré pour abaisser la température du fluide à refroidir de la première température à une seconde température, par exemple comprise entre 15 et 25K, dans lequel le système (21) de refroidissement comprend un premier réfrigérateur (21) à cycle de réfrigération d'un premier gaz de cycle comprenant de l'hélium et/ou de l'hydrogène, ledit premier réfrigérateur (21) comprenant, disposés en série dans un circuit (14) de cycle : un mécanisme (15) de compression du gaz de cycle, au moins un organe (6, 7, 8, 9) de refroidissement du gaz de cycle, un mécanisme (17) de détente du gaz de cycle et au moins un organe (10, 9, 8, 7, 6) de réchauffage du gaz de cycle détendu, dans lequel le mécanisme de compression comprend plusieurs étages de compression (15) en série composés d'un ensemble de compresseur(s) (15) de type centrifuge, les étages de compressions (15) étant monté sur des arbres (19) entraînés en rotation par un ensemble de moteur(s) (18), le mécanisme de détente comprenant plusieurs étages de détente composés d'un ensemble de turbines (17) de type centripète, dans lequel au moins une des turbines (17) est accouplée au même arbre (19) qu'au moins un étage de compression (15) de façon à fournir à l'étage de compression (15) du travail mécanique produit lors de la détente et en ce que le système (21) de pré-refroidissement comprend un second réfrigérateur (20) à cycle de réfrigération d'un second gaz de cycle, ledit le second réfrigérateur (20) comprenant, disposés en série dans un circuit (140) de cycle : un mécanisme (150) de compression du gaz de cycle, au moins

un organe (160, 6) de refroidissement du gaz de cycle, un mécanisme (170) de détente du gaz de cycle et au moins un organe (6) de réchauffage du gaz de cycle détendu, dans lequel le mécanisme de compression comprend plusieurs étages de compression (150) en série composés d'un ensemble de compresseur(s) (150) de type centrifuge, les étages de compressions (150) étant monté sur des arbres (190) entraînés en rotation par un ensemble de moteur(s) (180), le mécanisme de détente comprenant un ou plusieurs étages de détente composés d'un ensemble de turbine(s) (170) de type centripète dont au moins une est accouplée au même arbre (190) qu'au moins un étage de compression (150) de façon à fournir à l'étage de compression (150) du travail mécanique produit lors de la détente.

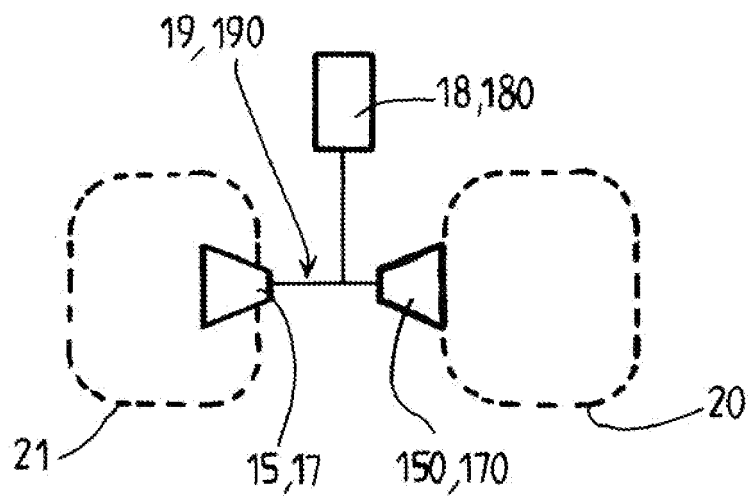
- [Revendication 2] Dispositif de liquéfaction selon la revendication 1, caractérisé en ce que le gaz de cycle du second réfrigérateur (20) comprend au moins l'un parmi : de l'azote, du néon, de l'hélium, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'argon ou du dioxyde de carbone.
- [Revendication 3] Dispositif de liquéfaction selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que le premier réfrigérateur (21) et le second réfrigérateur (20) comportent des moteurs respectifs de même type et/ou des compresseurs respectifs de même type, et/ou des turbines respectives de même type.
- [Revendication 4] Dispositif de liquéfaction selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le premier réfrigérateur (21) et le second réfrigérateur (20) comportent au moins un moteur (18, 180) commun dont l'arbre (19, 190) est accouplé à un ou des compresseurs (15) et/ou une ou des turbines du premier (21) réfrigérateur et accouplé également à un ou des compresseurs (150) du second (20) réfrigérateur et/ou une ou des turbines (170) du second (20) réfrigérateur.
- [Revendication 5] Dispositif de liquéfaction selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que l'ensemble de moteur(s) (18, 180) du premier et/ou du second réfrigérateur (21, 20) comprend au moins un moteur électrique à vitesse variable pilotée par un signal électrique, par exemple par variation de fréquence.
- [Revendication 6] Dispositif de liquéfaction selon la revendication 5, caractérisé en ce que l'ensemble de moteur(s) (180) du second réfrigérateur (20) comprend au moins un moteur électrique à vitesse variable pilotée par un signal électrique, par exemple par variation de fréquence et en ce que la puissance froide fournie par le second réfrigérateur détermine la première température et est fonction de la vitesse de rotation dudit au

- moins moteur (180).
- [Revendication 7] Dispositif de liquéfaction selon la revendication 5 ou 6, caractérisé en ce que l'ensemble de moteur(s) (18) du premier réfrigérateur (21) comprend au moins un moteur électrique à vitesse variable pilotée par un signal électrique, par exemple par variation de fréquence et en ce que la puissance froide fournie par le premier réfrigérateur détermine la seconde température et est fonction de la vitesse de rotation dudit au moins un moteur (18).
- [Revendication 8] Dispositif de liquéfaction selon l'une quelconque des revendication 1 à 7, caractérisé en ce qu'il comporte un organe (11) électronique de commande d'au moins un moteur(s) (18) du premier réfrigérateur (21) et d'au moins un moteur du second réfrigérateur (20), l'organe (11) de commande étant configuré pour piloter de façon conjointe la consigne de vitesse des moteurs des premier et second réfrigérateurs (20, 21).
- [Revendication 9] Dispositif de liquéfaction selon la revendication 8, dans lequel l'organe (11) de commande est configuré pour augmenter ou diminuer de façon identique en pourcentages les consignes de vitesse des moteurs des premier et second réfrigérateurs (20, 21).
- [Revendication 10] Procédé de liquéfaction d'un fluide tel que l'hydrogène et/ou l'hélium utilisant un dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, le procédé comprenant une étape de refroidissement du fluide à refroidir à la première température, par exemple comprise entre 30 et 110K via le second réfrigérateur (20) puis une étape de refroidissement du fluide à refroidir de la première température à la seconde température par exemple comprise entre 15 et 25K.
- [Revendication 11] Procédé de liquéfaction selon la revendication 10, caractérisé en ce qu'il comporte une étape de contrôle de la valeur de la première température via le pilotage de la vitesse d'au moins un des moteurs de l'ensemble de moteur(s) (180) du second réfrigérateur (20).
- [Revendication 12] Procédé de liquéfaction selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que les circuits de cycle (14, 140) du premier réfrigérateur (21) et du second réfrigérateur (20) contiennent le même gaz de cycle et sont interconnectés via au moins une vanne.

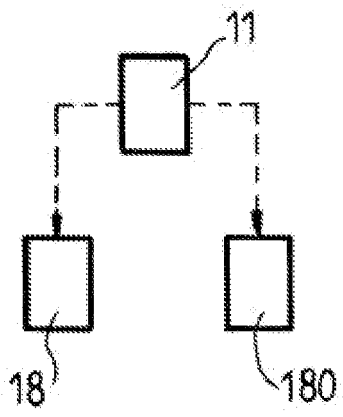
[Fig. 1]



[Fig. 2]



[Fig. 3]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 908575
FR 2207003

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	Quack H ET AL: "Search for the Best Processes to Liquefy Hydrogen in Very Large Plants", , 1 septembre 2012 (2012-09-01), XP055268718, Extrait de l'Internet: URL: http://www.idealhy.eu/uploads/document s/IDEALHY_Cryogenics_2012_Best_Processes.p df [extrait le 2016-04-26]	1-3, 8, 9, 11, 12	F25J1/02
Y	* page 4 - page 5; figure 3 * -----	4-7	
Y	SEYAM SHAIMAA ET AL: "Analysis of a clean hydrogen liquefaction plant integrated with a geothermal system", JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 243, 26 septembre 2019 (2019-09-26), XP085891937, ISSN: 0959-6526, DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.118562 [extrait le 2019-09-26] * figure 2 * -----	5-7	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) F25J
X	XU JINGXUAN ET AL: "Research on systems for producing liquid hydrogen and LNG from hydrogen-methane mixtures with hydrogen expansion refrigeration", INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 46, no. 57, 20 novembre 2020 (2020-11-20), pages 29243-29260, XP086720090, ISSN: 0360-3199, DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2020.10.251 [extrait le 2020-11-20] * figure 2 * ----- -/--	1, 10	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
15 février 2023		Schopfer, Georg	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet 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. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 908575
FR 2207003

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	XU JINGXUAN ET AL: "Integrated hydrogen liquefaction processes with LNG production by two-stage helium reverse Brayton cycles taking industrial by-products as feedstock gas", ENERGY, vol. 227, 1 juillet 2021 (2021-07-01), page 120443, XP055820487, AMSTERDAM, NL ISSN: 0360-5442, DOI: 10.1016/j.energy.2021.120443 * figure 3 *	1,10	
X	CN 114 518 015 A (YANG ZHAOMING) 20 mai 2022 (2022-05-20) * figure 2 *	1,10	
A	EP 3 249 319 A1 (MAEKAWA SEISAKUSHO KK [JP]) 29 novembre 2017 (2017-11-29) * figure 1 *	1,10	
Y	DE 10 2015 002164 A1 (LINDE AG [DE]) 25 août 2016 (2016-08-25) * figure 2 *	4	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
15 février 2023		Schopfer, Georg	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet 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. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2207003 FA 908575**

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 **15-02-2023**
 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
CN 114518015 A	20-05-2022	AUCUN	
EP 3249319 A1	29-11-2017	CN 107429954 A	01-12-2017
		EP 3249319 A1	29-11-2017
		ES 2747643 T3	11-03-2020
		JP 6557329 B2	07-08-2019
		JP WO2016178272 A1	28-09-2017
		KR 20170127018 A	20-11-2017
		RU 2674298 C1	06-12-2018
		US 2018087809 A1	29-03-2018
		WO 2016178272 A1	10-11-2016
DE 102015002164 A1	25-08-2016	DE 102015002164 A1	25-08-2016
		RU 2016105466 A	21-08-2017