

Description

Titre de l'invention : Procédé et installation de liquéfaction de l'hydrogène

Domaine Technique

- 5 [0001] La présente divulgation concerne le domaine de la cryogénie, et plus spécifiquement celui de la liquéfaction de l'hydrogène.

Technique antérieure

- 10 [0002] Afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre, l'hydrogène, obtenu de préférence en utilisant des sources d'énergie non-carbonées, est de plus en plus pris en considération en tant que vecteur énergétique. Or, pour obtenir une densité énergétique qui lui permette de rivaliser avec les hydrocarbures, en particulier pour les applications de transport, il est généralement préféré de le transporter et stocker sous forme liquide.
- 15 [0003] La liquéfaction de l'hydrogène exige toutefois une consommation énergétique considérable. Ainsi la consommation énergétique spécifique des installations de liquéfaction de l'hydrogène actuellement en service est d'environ 12 à 15 kWh par kilogramme d'hydrogène liquéfié. Par exemple, la société Linde[®], sur son site de Leuna, exploite une installation de liquéfaction appliquant un cycle de Claude
- 20 à l'hydrogène, combiné avec un pré-refroidissement exploitant la vaporisation de l'azote liquide, comme décrit par Berstad, Stang et Nekså dans « Comparison criteria for large-scale hydrogen liquefaction processes », International Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, no. 3, février 2009, pages 1560-1568. Cette installation a une consommation énergétique spécifique de 11,9 kWh par
- 25 kilogramme d'hydrogène liquéfié.
- [0004] Plusieurs alternatives ont été proposées pour réduire le coût et la consommation énergétique de la liquéfaction de l'hydrogène. Ainsi, dans « Large scale hydrogen liquefaction in combination with LNG re-gasification », Proceedings of the 16th World Hydrogen Energy Conference 2006, p. 3326–
- 30 3333, Kuendig, Lorchlein, Kramer et Huijsmans, ont proposé de remplacer, en tant que source de froid, la vaporisation de l'azote liquide par celle du gaz naturel

liquéfié, obtenant ainsi une synergie avec les processus nécessitant le gaz naturel à l'état gazeux. D'autres auteurs ont proposé des alternatives au cycle de Claude à l'hydrogène. Ainsi, Matsuda et Nagami ont proposé, dans « Study of large hydrogen liquefaction process » Hydrogen Energy, 1997, p. 175, d'appliquer le cycle de Brayton avec de l'hélium, voire même du néon comme réfrigérant. Le cycle de Brayton à l'hélium était également proposé par Kuz'menko, Morkovkin et Gurov dans « Concept of building medium-capacity hydrogen liquefiers with helium refrigeration cycle », Chemical and Petroleum Engineering, 2004, 40(1/2), p. 94–98. Toutefois, le cycle de Brayton à l'hélium ne se prête pas bien à une exploitation à grande échelle. Pour cette raison, Valenti et Macchi ont proposé, dans « Proposal of an innovative, high-efficiency, large-scale hydrogen liquefier », International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(12), p. 3116–3121, un procédé appliquant quatre cycles de Joule-Brayton en cascade. En pratique, l'efficacité énergétique de ce procédé ne semble toutefois pas garantie.

[0005] Quack, dans « Conceptual design of a high efficiency large capacity hydrogen liquefier », AIP Conference Proceedings, 2002, 613, p. 255–263, a proposé un procédé comprenant une compression initiale de l'hydrogène, suivie par un pré-refroidissement au propane, un refroidissement appliquant un cycle de Brayton inversé à deux étages au « nélium » (mélange d'hélium et de néon à proportion 4 : 1 molaire), et une détente dans un détendeur rotatif de gaz. Dans le cadre du projet européen IdealHY un procédé de liquéfaction de l'hydrogène a été conçu comprenant un pré-refroidissement au MR (acronyme anglais de « Mixed Refrigerant », c'est-à-dire « réfrigérant mixte », désignant un mélange comprenant de l'azote et des hydrocarbures), suivi d'un refroidissement au « nélium » et d'une liquéfaction par détente, tandis que Krasae-in a décrit, dans « Optimal operation of a large-scale liquid hydrogen plant utilizing mixed fluid refrigeration system », International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(13), p. 7015–7029, un procédé de liquéfaction de l'hydrogène comprenant un pré-refroidissement au MR et refroidissement appliquant une cascade de cycles de Joule-Brayton à l'hydrogène, et permettant théoriquement d'obtenir une consommation énergétique spécifique de seulement 5,35 kWh par kilogramme

d'hydrogène liquéfié pour une production à grande échelle de 100 tonnes métriques par jour.

[0006] Le fascicule de demande de brevet européen EP 1 580 506 A1 divulguait un procédé et une installation de liquéfaction de l'hydrogène avec une étape de pré-refroidissement par du gaz naturel liquéfié et une étape de refroidissement par un réfrigérant comprimé à basse température dans des compresseurs refroidis aussi par le gaz naturel liquéfié, tandis que Howe, Skinner et Finn divulguaient, dans « Advanced precooling for optimized hydrogen liquefaction », H2Tech, Mars 2021, d'autres procédés et installation de liquéfaction de l'hydrogène avec une étape de pré-refroidissement par un premier réfrigérant et une étape de refroidissement par un deuxième réfrigérant. Finalement, d'autres procédés et installations de liquéfaction d'hydrogène ont été divulgués dans les publications de demandes de brevets japonais JP 2004-210597 A et JP S61-140777.

15 Exposé de l'invention

[0007] Un premier aspect de la présente divulgation se rapporte à un procédé de liquéfaction de l'hydrogène offrant une moindre consommation énergétique spécifique grâce à une plus grande efficacité d'une étape de compression de réfrigérant, et cela avec un débit réglable d'hydrogène liquide.

20 [0008] Pour cela, dans le procédé suivant ce premier aspect, qui comprend une étape de pré-refroidissement, dans laquelle un débit d'alimentation en hydrogène est refroidi par un premier réfrigérant, une étape de refroidissement, dans laquelle le débit d'alimentation en hydrogène est refroidi par un deuxième réfrigérant, et une étape de détente du débit d'alimentation en hydrogène, chacun des premier et deuxième réfrigérants est successivement soumis à au moins une compression et à au moins une détente afin de le refroidir, et une phase liquide du premier réfrigérant refroidit le deuxième réfrigérant entre au moins trois étages d'une compression du deuxième réfrigérant pour que le deuxième réfrigérant ne dépasse pas une température de 150 K, de préférence 113 K, lors de ladite compression du deuxième réfrigérant.

[0009] La détente du débit d'alimentation en hydrogène peut en particulier être une détente sensiblement adiabatique. Par « sensiblement adiabatique » on entend,

dans le contexte de la présente divulgation, une détente dans laquelle l'enthalpie ne varie pas sensiblement, par exemple ne varie pas plus de 5%, voire même 1 %, dans la mesure où ceci peut être obtenu par des moyens conventionnels tels que, notamment, les vannes à effet Joule-Thomson, vannes de détente
5 thermiquement isolées.

[0010] Grâce à la division de la compression du deuxième réfrigérant entre au moins trois étages successifs et à l'utilisation du premier réfrigérant pour refroidir le deuxième réfrigérant entre au moins trois étages de cette compression, il est ainsi possible de maintenir la température du deuxième réfrigérant en dessous
10 du seuil de 150 K, voire même 113 K, pour ainsi atteindre un haut degré d'efficacité énergétique dans l'étape de refroidissement du débit d'alimentation en hydrogène par le deuxième réfrigérant.

[0011] Le premier réfrigérant peut notamment comprendre de l'azote et/ou de l'argon. Grâce au choix de l'azote et/ou de l'argon comme premier réfrigérant, il
15 est donc possible d'effectuer ladite compression du deuxième réfrigérant à une température particulièrement basse, ce qui permet d'augmenter l'efficacité énergétique du cycle du deuxième réfrigérant.

[0012] La phase liquide du premier réfrigérant peut refroidir le deuxième réfrigérant en amont de chacun desdits au moins trois étages de la compression du
20 deuxième réfrigérant, de manière à ce que la température initiale du deuxième réfrigérant dans chacun desdits au moins trois étages soit sensiblement identique, facilitant ainsi l'utilisation d'éléments communs pour lesdits au moins trois étages de compression.

[0013] Le deuxième réfrigérant peut comprendre principalement, voire uniquement, de l'hydrogène. Alternativement ou en complément à l'hydrogène, le deuxième
25 réfrigérant peut néanmoins comprendre du néon et/ou de l'hélium, afin d'en augmenter la densité et donc éventuellement permettre d'effectuer sa compression en moins d'étages.

[0014] Afin de permettre un refroidissement graduel du débit d'alimentation en
30 hydrogène sur une large plage de températures, le deuxième réfrigérant peut être divisé en un premier flux qui soit soumis à une détente pour le refroidir et un deuxième flux qui soit refroidi par le premier flux du deuxième réfrigérant après la

détente du premier flux du deuxième réfrigérant. Le deuxième flux du deuxième réfrigérant peut être soumis à une détente, en particulier à une détente sensiblement adiabatique, après avoir été refroidi par le premier flux du deuxième réfrigérant.

- 5 [0015] De manière analogue et pour les mêmes raisons, le premier réfrigérant peut aussi être divisé en un premier flux qui soit soumis à une détente pour le refroidir et un deuxième flux qui soit refroidi par le premier flux du premier réfrigérant après la détente du premier flux du premier réfrigérant. Le premier flux du deuxième réfrigérant peut aussi être soumis à une détente, en particulier à une
10 détente sensiblement adiabatique, après avoir été refroidi par le premier flux du deuxième réfrigérant.

[0016] Afin d'améliorer l'efficacité du pré-refroidissement, le débit d'alimentation en hydrogène peut être refroidi aussi par un troisième réfrigérant pendant l'étape de pré-refroidissement.

- 15 [0017] Un deuxième aspect de la présente divulgation se rapporte à une installation de liquéfaction de l'hydrogène, pouvant être apte à effectuer le procédé du premier aspect et comprenant pour cela au moins un circuit d'alimentation en hydrogène, un premier circuit de réfrigérant, en particulier en boucle fermée, contenant un premier réfrigérant, un deuxième circuit de réfrigérant, en particulier
20 en boucle fermée, contenant un deuxième réfrigérant, un premier ensemble d'échangeurs de chaleur traversés par le circuit d'alimentation en hydrogène et par le premier circuit de réfrigérant, un deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur traversés par le deuxième circuit de réfrigérant et par le circuit d'alimentation en hydrogène en aval du premier ensemble d'échangeurs de
25 chaleur, et un détendeur traversé par le circuit d'alimentation en hydrogène en aval du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur. Dans le présent contexte, on entend par « détendeur » tout dispositif apte à effectuer une détente d'un fluide, que ce soit avec extraction de travail, comme par exemple une turbine, ou de manière sensiblement adiabatique, comme par exemple une vanne de
30 détente adiabatique. Les termes « amont » et « aval » doivent être compris suivant un sens de circulation normal du fluide dans chaque circuit.

[0018] Afin d'atteindre un haut degré d'efficacité énergétique dans le refroidissement d'un débit d'alimentation en hydrogène, le premier circuit de réfrigérant peut comprendre un ou plusieurs compresseurs et un ou plusieurs détendeurs, et le deuxième circuit de réfrigérant peut comprendre au moins trois compresseurs et un dispositif de refroidissement disposés ensemble de manière à effectuer au moins trois compressions du deuxième réfrigérant sans dépasser une température de 150 K, de préférence 113 K, et un ou plusieurs détendeurs. Le dispositif de refroidissement peut être configuré pour refroidir le deuxième réfrigérant dans le deuxième circuit de réfrigérant avec une phase liquide du premier réfrigérant dans le premier circuit de réfrigérant, en particulier dans une cuve du premier circuit de réfrigérant. En particulier, le deuxième circuit de réfrigérant comprend plusieurs échangeurs intermédiaires intercalés entre lesdits au moins trois compresseurs du deuxième circuit de réfrigérant, et éventuellement disposés dans la cuve du premier circuit de réfrigérant, pour maintenir la température du deuxième réfrigérant. Afin d'obtenir une température d'admission sensiblement identique pour chacun desdits au moins trois compresseurs du deuxième circuit de réfrigérant, et ainsi faciliter l'utilisation d'éléments sensiblement identiques pour chacun desdits au moins trois compresseurs du deuxième circuit de réfrigérant, un desdits échangeurs intermédiaires peut être disposé en amont de chacun desdits au moins trois compresseurs du deuxième circuit de réfrigérant.

[0019] Du lubrifiant est normalement présent dans les paliers des compresseurs volumétriques typiquement utilisés dans les installations de liquéfaction de l'hydrogène et peut s'échapper vers le flux de réfrigérant. Or, aux températures cryogéniques auxquelles les compresseurs du deuxième circuit de réfrigérant fonctionnent, ces fuites de lubrifiant pourraient avoir des effets délétères dans ce deuxième circuit de réfrigérant, et exiger un dispositif d'extraction de ce lubrifiant. Afin d'éviter cela, lesdits compresseurs du deuxième circuit de réfrigérant peuvent être à paliers magnétiques, en particulier à paliers magnétiques actifs. Par ailleurs, pour réduire l'usure, fréquemment associée aux compresseurs volumétriques, ils peuvent être des compresseurs centrifuges. Ils peuvent par ailleurs être à entraînement électrique de manière à être compatibles avec leur

immersion totale ou partielle dans la phase liquide du premier réfrigérant à température cryogénique.

[0020] Afin d'assurer la stabilité isomérique, en aval de chaque échangeur de chaleur, de l'hydrogène du débit d'alimentation, au moins un échangeur de chaleur du premier ensemble ou du deuxième ensemble peut être un échangeur catalytique, exposant le débit d'alimentation à un catalyseur tel que, par exemple, de l'oxyde de fer trivalent, pour y effectuer une conversion catalytique ortho-para.

[0021] Pour maintenir la température du premier réfrigérant lors de sa compression, et ainsi assurer une compression sensiblement isotherme, les compresseurs du premier circuit de réfrigérant peuvent être refroidis par eau. Un refroidissement par air est toutefois aussi envisageable pour les compresseurs du premier circuit.

[0022] Afin d'assurer un refroidissement graduel et énergétiquement efficient, le deuxième circuit de réfrigérant peut comporter un embranchement, en aval desdits compresseurs du deuxième circuit de réfrigérant, avec une première branche comportant un ou plusieurs desdits détendeurs du deuxième circuit de réfrigérant en amont d'au moins un des échangeurs de chaleur du deuxième ensemble en aval, et une deuxième branche traversant au moins un des échangeurs de chaleur du deuxième ensemble en amont d'une confluence avec la première branche du deuxième circuit de réfrigérant en amont desdits compresseurs du deuxième circuit de réfrigérant.

[0023] Afin d'assurer un pré-refroidissement graduel et énergétiquement efficient, le premier circuit de réfrigérant peut comporter, de manière analogue au deuxième circuit de réfrigérant, un embranchement, en aval des compresseurs du premier circuit de réfrigérant, avec une première branche comportant au moins un desdits détendeurs du premier circuit de réfrigérant en amont d'au moins un des échangeurs de chaleur du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, et une deuxième branche traversant au moins un des échangeurs de chaleur du premier ensemble d'échangeurs de chaleur en amont d'une confluence avec la première branche du premier circuit de réfrigérant en amont des compresseurs du premier circuit de réfrigérant.

[0024] L'installation peut comporter en outre un troisième circuit de réfrigérant contenant un troisième réfrigérant et traversant aussi un ou plusieurs échangeurs de chaleur du premier ensemble d'échangeurs de chaleur.

5 Brève description des dessins

[0025] La description se réfère aux dessins annexés sur lesquels :

[0026] [Fig. 1] La figure 1 est une illustration schématique d'une installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant un premier mode de réalisation.

10 [0027] [Fig. 2] La figure 2 est une illustration schématique d'une installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant une variante du premier mode de réalisation.

[0028] [Fig. 3] La figure 3 est une illustration schématique d'une installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant un deuxième mode de réalisation.

Description des modes de réalisation

15 [0029] L'invention sera bien comprise et ses avantages apparaîtront mieux, à la lecture de la description détaillée qui suit, de modes de réalisation représentés à titre d'exemples non limitatifs. Les valeurs de température et pression indiquées, à titre d'exemples, dans cette description détaillée sont des valeurs absolues.

20 [0030] La figure 1 illustre une installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant un mode de réalisation spécifique. Comme illustré, cette installation peut comprendre un circuit d'alimentation en hydrogène H, un premier circuit de réfrigérant R1 et un deuxième circuit de réfrigérant R2.

25 [0031] A partir d'une admission I, le circuit d'alimentation en hydrogène H peut traverser successivement un premier ensemble d'échangeurs de chaleur HX11, HX12, HX13 traversés également par le premier circuit de réfrigérant R1, et un deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur HX21, HX22, HX23, HX24, HX25, HX26, traversés également par le deuxième circuit de réfrigérant R2, avant d'aboutir dans un détendeur JTH, par exemple sous forme d'une vanne de détente adiabatique, débouchant dans un séparateur de phase TH avec une
30 sortie O d'hydrogène liquide. Il peut comporter en outre un compresseur de

réinjection et/ou éjecteur EJ, disposé en amont au moins du dernier échangeur de chaleur HX26, et connecté au ciel du séparateur de phase TH à travers un conduit de recirculation H1 pour récupérer de l'hydrogène gazeux du séparateur de phase TH et le réinjecter dans le circuit d'alimentation en hydrogène H en amont du dernier échangeur de chaleur HX26. Chacun des échangeurs de chaleur peut être un échangeur catalytique comportant un catalyseur, tel que par exemple de l'oxyde de fer trivalent, pour opérer une conversion ortho-para dans un flux d'hydrogène circulant dans le circuit d'alimentation en hydrogène H.

[0032] Le premier circuit de réfrigérant R1 peut être un circuit de réfrigérant en boucle fermée, contenant un réfrigérant tel que, par exemple, de l'azote et/ou de l'argon, et pouvant comprendre une pluralité de compresseurs C1 en série, un premier détendeur JT1, par exemple sous la forme d'une vanne de détente adiabatique, une cuve T1, et un deuxième détendeur E1, par exemple sous la forme d'une turbine, pouvant être centripète ou axiale.

[0033] Comme illustré, ce premier circuit de réfrigérant R1 peut comprendre, en aval des compresseurs C1 et plus précisément en aval du premier échangeur de chaleur HX11 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, un embranchement S1 divisant le premier circuit de réfrigérant R1 en deux branches R11 et R12. Le deuxième détendeur E1 peut être disposé sur la première branche R11 du premier circuit de réfrigérant R1 en aval de l'embranchement S1. En aval du deuxième détendeur E1, la première branche R11 du premier circuit de réfrigérant R1 peut traverser le deuxième échangeur de chaleur HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur.

[0034] A partir de l'embranchement S1, la deuxième branche R12 peut traverser le deuxième échangeur de chaleur HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur. Le premier détendeur JT1 et la cuve T1 peuvent être disposés sur cette deuxième branche R12 en aval du deuxième échangeur de chaleur HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, et les troisième et deuxième échangeurs de chaleur HX13, HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur peuvent être traversés par cette deuxième branche R12 du premier circuit de réfrigérant R1 en ordre inversé en aval d'une sortie de gaz de cette cuve T1 qui rejoint ensuite la première branche R11. La sortie de la cuve T1 pourrait toutefois être alternativement une sortie de liquide.

[0035] En aval de la confluence des deux branches R11 et R12, le premier circuit de réfrigérant R1 peut encore traverser le premier échangeur de chaleur HX11 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur avant de retourner aux compresseurs C1. Les compresseurs C1 peuvent être des compresseurs refroidis par eau. Il est par exemple envisageable pour cela d'intercaler des échangeurs de chaleur intermédiaires (non illustrés) entre les compresseurs C1.

[0036] Le premier circuit de réfrigérant R1 peut par ailleurs comprendre au moins un absorbeur de contaminants, tels que l'eau ou l'oxygène, dans la phase liquide du premier réfrigérant. Cet absorbeur peut notamment prendre la forme d'un lit de poudre pour absorber les espèces chimiques circulant dans ce premier circuit de réfrigérant R1 et dont la température de liquéfaction soit supérieure à la température de la phase liquide dans la cuve T1, et être régénérable, par exemple en le chauffant. Ainsi, cet absorbeur peut permettre d'éviter la propagation en aval de polluants qui pourraient, en se solidifiant, venir bloquer premier circuit de réfrigérant R1, notamment au niveau des échangeurs de chaleur HX11, HX12, HX13 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, ou venir endommager les détendeurs JT1, E1 et/ou les compresseurs C1.

[0037] Le deuxième circuit de réfrigérant R2 peut être un circuit de réfrigérant en boucle fermée, contenant un réfrigérant tel que, par exemple, de l'hydrogène. Ce deuxième circuit de réfrigérant R2 peut comprendre une pluralité de compresseurs C21, C22, C23, C24 une pluralité d'échangeurs de chaleur intermédiaires IC, un premier détendeur JT2, par exemple sous forme d'une vanne de détente adiabatique JT2, d'autres détendeurs E21, E22 et E23, par exemple sous forme de turbines, et deux compresseurs supplémentaires C20a, C20b, pouvant chacun comprendre plusieurs étages.

[0038] Les échangeurs de chaleur intermédiaires IC peuvent être, comme illustré, disposés directement en amont et en aval de chacun des compresseurs C21, C22, C23, C24 dans le deuxième circuit de réfrigérant R2, et immergés partiellement ou totalement dans une phase liquide du premier réfrigérant dans la cuve T1, de manière à permettre une compression du deuxième réfrigérant à une température cryogénique, par exemple sans dépasser 150 K, de préférence 113 K, dans aucun de ces compresseurs C21, C22, C23 et C24. Un échangeur de chaleur intermédiaire IC étant disposé en amont de chacun des compresseurs

- C21, C22, C23, et C24, les températures d'admission respectives de chacun de ces compresseurs C21, C22, C23 et C24 pourront être sensiblement identiques. En aval des compresseurs C21, C22, C23 et C24 et des échangeurs de chaleur intermédiaires IC, le deuxième circuit de réfrigérant R2 peut traverser le premier
- 5 échangeur de chaleur HX21 du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur. Dans le deuxième circuit de réfrigérant R2, un embranchement S2 divisant le deuxième circuit de réfrigérant en une première branche R21 et une deuxième branche R22 peut être disposé en aval du premier échangeur de chaleur HX21 du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur.
- 10 [0039] Le détendeur E21 peut être disposé, en aval de l'embranchement S2, sur la première branche R21 du deuxième circuit de réfrigérant R2, qui peut traverser ensuite le troisième échangeur de chaleur HX23 du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur, en aval duquel peuvent être successivement disposés les détendeurs E22 et E23. La première branche R21 peut alors traverser les
- 15 échangeurs de chaleur HX24, HX23, HX22 et HX21 en ordre inversé.
- [0040] En aval de l'embranchement S2, la deuxième branche R22 du deuxième circuit de réfrigérant R2 peut traverser successivement les échangeurs de chaleur HX22, HX23, HX24, HX25 du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur. Le détendeur JT2 peut être disposé sur la deuxième branche R22 du
- 20 deuxième circuit de réfrigérant, en aval de ces échangeurs de chaleur et en amont du dernier échangeur de chaleur HX26 du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleurs, que la deuxième branche R22 du deuxième circuit de réfrigérant R2 traverse avant de traverser encore les échangeurs de chaleur HX25, HX24, HX23, HX22 et HX21 du deuxième ensemble d'échangeurs de
- 25 chaleur en ordre inverse. Les compresseurs supplémentaires C20a, C20b peuvent être disposés au bout de la deuxième branche R22 du deuxième circuit de réfrigérant R2 pour permettre au flux de réfrigérant de cette deuxième branche R22 du deuxième circuit de réfrigérant R2 de rejoindre en aval celui de la première branche R21 du deuxième circuit de réfrigérant R2 à une confluence
- 30 en amont des compresseurs C21, C22, C23 et C24 et échangeurs de chaleur intermédiaires IC.
- [0041] Un écran thermique (non illustré), par exemple refroidi à l'azote liquide, peut entourer au moins une partie du deuxième circuit de réfrigérant R2 et du

deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur HX21, HX22, HX23, HX24, HX25, HX26 afin d'en limiter la charge thermique. La deuxième branche R22 du deuxième circuit de réfrigérant R2 peut aussi comprendre un réservoir tampon (non illustré) en aval du détendeur JT2 afin d'absorber les variations de régime.

5 [0042] En fonctionnement, cette installation peut mettre en œuvre un procédé de liquéfaction de l'hydrogène dans lequel un débit d'alimentation en hydrogène gazeux introduit par le circuit d'alimentation en hydrogène H à une pression de, par exemple, 2,1 MPa, et une température de, par exemple, 298 K, peut être
10 d'abord refroidi jusqu'à une température de, par exemple, 85 K, par les échangeurs de chaleur HX11 et HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, puis encore refroidi jusqu'à une température de, par exemple, 82 K, par le dernier échangeur de chaleur HX13 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur. En outre, afin d'assurer la stabilité isomérique de l'hydrogène à cette
15 température et éviter son réchauffement ultérieur, cet échangeur de chaleur HX13 peut opérer, en tant qu'échangeur catalytique, une conversion catalytique ortho-para du débit d'alimentation pour y augmenter le taux de para-hydrogène par exemple de 25 à 48%.

[0043] Le flux d'hydrogène à liquéfier traverse ensuite successivement les échangeurs de chaleur HX21, HX22, HX23, HX24 et HX25, où il est
20 progressivement refroidi jusqu'à une température de, par exemple, 26 K, et voit son taux de para-hydrogène progressivement augmenter jusqu'à, par exemple, 98 % en aval de l'échangeur de chaleur HX25. Il peut pour cela passer par exemple d'un taux de para-hydrogène de 48 % en amont de l'échangeur de chaleur HX21 à un taux de 58% en aval de cet échangeur de chaleur HX21, puis
25 à un taux de 67% en aval de l'échangeur de chaleur HX22, 77,5% en aval de l'échangeur de chaleur HX23, et 96% en aval de l'échangeur de chaleur HX24.

[0044] Dans le dernier échangeur de chaleur HX26, le flux d'hydrogène à liquéfier circulant par le circuit d'alimentation H peut être encore refroidi, et son taux de para-hydrogène augmenté encore jusqu'à, par exemple, 99 %. Finalement, sa
30 détente, pouvant être sensiblement adiabatique, d'une pression de, par exemple, 2 MPa, en amont de du détendeur JTH à une pression de sortie de, par exemple, 0,2 MPa, permet d'encore réduire sa température jusqu'à une température de, par exemple, 22,81K. En aval du détendeur JTH, le flux d'hydrogène circulant

vers la cuve TH peut ainsi être liquide, par exemple, jusqu'à 98%. La phase gazeuse restante peut être extraite du ciel de la cuve TH d'hydrogène liquide par le conduit H1, et réinjectée en amont du dernier échangeur de chaleur HX26 par l'éjecteur EJ.

- 5 [0045] Dans le premier circuit de réfrigérant R1, le premier réfrigérant, qui peut notamment comprendre de l'azote, peut être comprimé par les compresseurs C1, avec un débit de, par exemple, 11,96 kg/s, d'une pression de, par exemple, 0,11 MPa, à une pression de, par exemple, 5 MPa, et cela de manière sensiblement isotherme à une température de, par exemple, 285 K. Ensuite, ce premier
- 10 réfrigérant peut être refroidi jusqu'à une température de, par exemple, 200 K, dans le premier échangeur de chaleur HX11 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur. A l'embranchement S1, en aval de ce premier échangeur de chaleur HX11, le premier réfrigérant peut être divisé en deux flux.

- [0046] Un premier flux du premier réfrigérant, qui peut comprendre par exemple 70
- 15 % du débit total du premier réfrigérant, peut être dirigé à travers la première branche R11 du premier circuit de réfrigérant R1 vers le détendeur E1, où il peut être détendu jusqu'à une pression de, par exemple, 0,12 MPa, de manière à réduire sa température jusqu'à une température de, par exemple, 84 K, pour ensuite traverser le deuxième échangeur de chaleur HX12 du premier ensemble
- 20 d'échangeurs de chaleur en y absorbant de la chaleur.

- [0047] Un deuxième flux du premier réfrigérant, qui peut comprendre le restant du débit du premier réfrigérant, peut être dirigé, à travers la deuxième branche R12 du premier circuit de réfrigérant, vers le deuxième échangeur de chaleur HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, pour y être refroidi jusqu'à une
- 25 température de, par exemple, 85 K, pour ensuite être détendu, en particulier de manière sensiblement adiabatique, au détendeur JT1, et ainsi le liquéfier au moins partiellement en y réduisant sa température jusqu'à, par exemple, 80K. En aval du détendeur JT1, ce deuxième flux du premier réfrigérant, au moins partiellement liquide, peut être reçu dans la cuve T1, en aval de laquelle il peut
- 30 encore traverser, en ordre inversé, les troisième et deuxième échangeurs de chaleur HX13, HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur pour y être réchauffé avant de rejoindre le premier flux du premier réfrigérant. En aval de cette confluence des deux flux du premier réfrigérant, le premier réfrigérant peut

encore traverser le premier échangeur de chaleur HX11 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur pour y être réchauffé avant de retourner aux compresseurs C1 du premier circuit de réfrigérant.

- [0048] Dans le deuxième circuit de réfrigérant R2, le deuxième réfrigérant, qui peut notamment être de l'hydrogène, peut être comprimé par les compresseurs C21, C22, C23, et C24 avec un débit de, par exemple, 0,666 kg/s, d'une pression de, par exemple, 0,45 MPa, à une pression de, par exemple, 2,94 MPa, et cela sans dépasser une température maximale de, par exemple, 100 K, grâce au passage du deuxième réfrigérant par les échangeurs intermédiaires IC en amont et en aval de chacun des compresseurs C21, C22, C23 et C24. Chacun des compresseurs C21, C22, C23 et C24 peut être entraîné avec une puissance de, par exemple, 140 kW. Les vitesses respectives des compresseurs C21, C22, C23 et C24 peuvent être montantes en direction de l'écoulement du deuxième réfrigérant. Ainsi, le compresseur C21 peut tourner à une première vitesse de, par exemple, 80 000 tours par minute, le compresseur C22 peut tourner à une deuxième vitesse de, par exemple, 90 000 tours par minute, supérieure à la première vitesse, le compresseur C23 peut tourner à une troisième vitesse de, par exemple, 115 000 tours par minute, supérieure à la deuxième vitesse, et le compresseur C24 peut tourner à une quatrième vitesse de, par exemple, 125 000 tours par minute, supérieure à la troisième vitesse. Après avoir été refroidi jusqu'à une température initiale de, par exemple, 82 K, dans le premier échangeur intermédiaire IC, le premier réfrigérant peut ainsi être comprimé jusqu'à des pressions de, par exemple, 0,72 MPa, 1,16 MPa, 1,84 MPa et 2,96 MPa respectivement en aval des compresseurs C21, C22, C23 et C24, atteignant une température de, par exemple, 100 K en aval de chacun de ces compresseurs C21, C22, C23 et C24, pour être ensuite refroidi jusqu'à sensiblement la même température initiale dans chaque échangeur intermédiaire IC subséquent, avec une perte de charge de, par exemple, 0,02 MPa dans chaque échangeur intermédiaire IC.
- [0049] Ensuite, ce premier réfrigérant peut être refroidi jusqu'à une température de, par exemple, 69 K, dans le premier échangeur de chaleur HX21 du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur. Le premier réfrigérant peut alors être divisé en deux flux à l'embranchement S2.

- [0050] Un premier flux du deuxième réfrigérant, qui peut comprendre par exemple 88 % du débit total du deuxième réfrigérant, peut alors être dirigé à travers la première branche R21 du deuxième circuit de réfrigérant R2 vers le détendeur E21, où il peut être détendu jusqu'à une pression de, par exemple, 1,9 MPa, de manière à réduire sa température jusqu'à une température de, par exemple, 60 K, pour ensuite traverser le troisième échangeur de chaleur HX23 du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur et y être refroidi à, par exemple, 51 K, avant d'être encore progressivement détendu jusqu'à une pression de, par exemple, 0,5 MPa, aux détendeurs E22 et E23, de manière à réduire encore sa température jusqu'à, par exemple 31,5 K. Il peut ensuite traverser encore les quatrième, troisième, deuxième et premier échangeurs de chaleur HX24, HX23, HX22 et HX21 en ordre inversé pour y absorber de la chaleur jusqu'à atteindre une température de, par exemple 80 K à une pression de, par exemple, 0,45 MPa.
- [0051] Un deuxième flux du deuxième réfrigérant, qui peut comprendre le restant du débit du deuxième réfrigérant, peut être dirigé, à travers la deuxième branche R22 du deuxième circuit de réfrigérant R2, vers les deuxième, troisième, quatrième et cinquième échangeurs de chaleur HX22, HX23, HX24, HX25 du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur, pour y être successivement refroidi jusqu'à une température de, par exemple, 26 K, pour ensuite être détendu, en particulier de manière sensiblement adiabatique, jusqu'à une pression de, par exemple, 0,17 MPa, au détendeur JT2, et ainsi y réduire sa température jusqu'à, par exemple, 22 K. En aval du détendeur JT2, ce deuxième flux du deuxième réfrigérant peut encore traverser en ordre inversé les sixième, cinquième, quatrième, troisième, deuxième et premier échangeurs de chaleur HX26, HX25, HX24, HX23, HX22 et HX21 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur pour y absorber de la chaleur jusqu'à atteindre une température de, par exemple, 80 K à une pression de, par exemple, 0,15 MPa. Pour lui permettre de rejoindre le premier flux du deuxième réfrigérant à la confluence des deux branches R21, R22 du deuxième circuit R2, avant de revenir vers les compresseurs C21, C22, C23, C24 et les échangeurs intermédiaires IC, le deuxième flux peut encore être comprimé jusqu'à la même pression que le premier flux dans les compresseurs supplémentaires C20a, C20b. Le

compresseur supplémentaire C20a peut être un compresseur à deux étages, entraîné avec une puissance de, par exemple, 25 kW, à une vitesse de, par exemple, 100 000 tours par minute, pour comprimer ce deuxième flux jusqu'à une pression de, par exemple, 0,3 MPa et une température de, par exemple, 113 K, tandis que le compresseur supplémentaire C20b peut aussi être un compresseur à deux étages, entraîné avec une puissance de, par exemple, 25 kW, à une vitesse de, par exemple, 100 000 tours par minute, pour comprimer ce deuxième flux jusqu'à une pression de, par exemple, 0,45 MPa et une température de, par exemple, 131,5 K.

[0052] Ainsi, le cycle de réfrigération appliqué dans le deuxième circuit de réfrigérant R2 est un cycle de Claude à deux pressions. Bien que, pour ce premier mode de réalisation, il ait été proposé d'utiliser l'hydrogène comme deuxième réfrigérant, il est aussi envisageable d'utiliser d'autres réfrigérants, comme le hélium, voire même un mélange d'hydrogène et de néon. Dans ce mode de réalisation alternatif, afin d'éviter le blocage du deuxième circuit de réfrigérant par du néon solide, il serait préférable de séparer le néon du deuxième réfrigérant avant que sa température ne descende en dessous de 25 K. Pour cela, il est notamment envisageable d'utiliser la condensation du néon et sa séparation en phase liquide. De manière analogue, il est aussi envisageable d'utiliser d'autres substances alternativement ou en complément de l'azote en tant que premier réfrigérant, comme par exemple l'argon. Toutes les pressions mentionnées à titre d'exemple dans cette description doivent être comprises en tant que pressions absolues.

[0053] La figure 2 illustre schématiquement une installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant une variante du premier mode de réalisation, dans laquelle le dernier échangeur de chaleur HX13 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur peut être intégré dans la cuve T1 du premier circuit de réfrigérant R1, de manière à y être immergé partiellement ou totalement dans la phase liquide du premier réfrigérant. Les éléments restants de l'installation illustrée sur la figure 2 sont identiques ou équivalents à ceux de l'installation de la figure 1 et y reçoivent en conséquence les mêmes repères. Son fonctionnement est également analogue.

[0054] La figure 3 illustre schématiquement une installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant un deuxième mode de réalisation, pouvant comprendre un troisième circuit de réfrigérant R3. Ce troisième circuit de réfrigérant R3 peut être un circuit de réfrigérant en boucle fermée, contenant un troisième réfrigérant. Ce
5 troisième réfrigérant peut être un réfrigérant mixte, et notamment un réfrigérant mixte comprenant des hydrocarbures. Un tel réfrigérant mixte peut être formé par un mélange d'azote, méthane, éthane, propane et butane.

[0055] Le troisième circuit de réfrigérant R3 peut comprendre un ensemble de compresseurs C3 en amont d'un premier séparateur de phase T31, qui peut
10 former un premier embranchement du troisième circuit de réfrigérant R3, le divisant en une première branche R31, pouvant comprendre un compresseur supplémentaire C3', et une deuxième branche R32, pouvant comprendre une pompe P3. Ces deux branches R31, R32 peuvent se rejoindre en aval du compresseur C3' et la pompe P3, en amont d'un deuxième séparateur de phase
15 T32, qui peut former un deuxième embranchement du troisième circuit réfrigérant R3, le divisant en une troisième branche R33 et une quatrième branche R34.

[0056] La troisième branche R33 peut comprendre un détendeur JT33, par exemple sous la forme d'une vanne de détente adiabatique, et traverser, tant en amont qu'en aval de ce détendeur JT33, un premier échangeur de chaleur HX10 du
20 premier ensemble d'échangeurs de chaleur, pouvant comprendre quatre échangeurs de chaleur HX10, HX11, HX12 et HX13 dans ce deuxième mode de réalisation, pour ensuite retourner en amont de l'ensemble de compresseurs C3.

[0057] La quatrième branche R34 peut également traverser le premier échangeur de chaleur HX10 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, en amont d'un
25 troisième séparateur de phase T33, qui peut former un troisième embranchement du troisième circuit de réfrigérant R3, divisant la quatrième branche R34 en une cinquième branche R35 et une sixième branche R36.

[0058] La cinquième branche R35 peut comprendre un détendeur JT35, par exemple sous la forme d'une vanne de détente adiabatique, et traverser, tant en amont qu'en aval de ce détendeur JT35, le deuxième échangeur de chaleur HX11 du
30 premier ensemble d'échangeurs de chaleur.

[0059] La sixième branche R36 peut comprendre également un détendeur JT36, par exemple sous la forme d'une vanne de détente adiabatique, et traverser successivement, en amont de ce détendeur, les deuxième et troisième échangeurs de chaleur HX11, HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, pour les traverser à nouveau, en ordre inversé, en aval du détendeur JT36, avant de rejoindre la cinquième branche R35.

[0060] Le premier échangeur de chaleur HX10 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur peut encore être traversé par la quatrième branche R34 en aval de la confluence des cinquième et sixième branches R35, R36, en amont d'une confluence de la quatrième branche R34 avec la troisième branche R33 en amont du retour vers les compresseurs C3.

[0061] Comparé à celui du premier mode de réalisation, le premier circuit de réfrigérant R1 peut être simplifié, et ne former qu'une simple boucle traversant, en aval des compresseurs C1, les premier à troisième échangeurs de chaleur HX10, HX11, HX12 dans un premier sens, pour ensuite les traverser en ordre inverse en aval d'un unique détendeur JT1, qui peut être sous la forme d'une vanne de détente adiabatique, et de la cuve T1, avant de revenir vers l'admission des compresseurs C1. Comme dans la variante du premier mode de réalisation, un dernier échangeur de chaleur HX13 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur HX10, HX11, HX12, HX13 traversé par le circuit d'alimentation en hydrogène H peut être intégré dans la cuve T1 pour y être immergé partiellement ou totalement dans la phase liquide du premier réfrigérant.

[0062] Les éléments restants de l'installation suivant ce deuxième mode de réalisation peuvent être identiques ou équivalents à ceux du premier mode de réalisation et reçoivent en conséquence les mêmes repères.

[0063] En fonctionnement, dans le troisième circuit de réfrigérant R3, le troisième réfrigérant peut être d'abord comprimé, dans les compresseurs C3, par exemple de 0,1 MPa à 1,1 MPa. A cette pression, une phase liquide peut apparaître, qui peut être séparée de la phase gazeuse du troisième réfrigérant dans le premier séparateur de phase T31 du troisième circuit de réfrigérant R3, pour être dérivée vers la deuxième branche R32 du troisième circuit de réfrigérant R3 et y être pompée par la pompe P3 jusqu'à une pression de, par exemple, 2,2 MPa, tandis

que la phase gazeuse peut être dirigée à travers la première branche R31, pour y être comprimée par le compresseur supplémentaire C3' jusqu'à la même pression que la phase liquide de la deuxième branche R32. La séparation des phases et le pompage de la phase liquide par une pompe, pour la dernière
5 augmentation de pression, permet de limiter la consommation énergétique pour cette étape.

[0064] En aval de la confluence des première et deuxième branches R31, R32 du troisième circuit de réfrigérant R3, des phases gazeuse et liquide peuvent être séparées à nouveau dans le deuxième séparateur de phase T32, pour diriger la
10 phase liquide à travers la troisième branche R33 et la phase gazeuse à travers la quatrième branche R34.

[0065] La fraction liquide du troisième réfrigérant dirigée à travers la troisième branche R33 du troisième circuit de réfrigérant R3 peut être d'abord refroidie jusqu'à une température de, par exemple, 182 K, dans le premier échangeur de
15 chaleur HX10 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, pour être ensuite détendue, en particulier de manière sensiblement adiabatique, jusqu'à une pression de, par exemple, 0,1 MPa, dans le détendeur JT33 de la troisième branche R33, avant de traverser à nouveau le premier échangeur de chaleur HX10 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur pour y absorber de la
20 chaleur, et être ensuite reconduite vers les compresseurs C3.

[0066] La fraction gazeuse du troisième réfrigérant dirigée à travers la quatrième branche R34 du troisième circuit de réfrigérant R3 peut d'abord être également refroidie jusqu'à une température de, par exemple, 182 K, dans le premier
échangeur de chaleur HX10 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur pour
25 s'y condenser partiellement avant d'arriver au troisième séparateur de phase T33, dans lequel des phases liquide et solide peuvent à nouveau être séparées pour être dirigées, respectivement, à travers les cinquième et sixième branches R35, R36 du troisième circuit de réfrigérant.

[0067] La fraction liquide du troisième réfrigérant dirigée à travers la cinquième
30 branche R35 du troisième circuit de réfrigérant R3 peut être refroidie jusqu'à une température de, par exemple, 115 K dans le deuxième échangeur HX11 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, pour être ensuite détendue, en

particulier de manière sensiblement adiabatique, jusqu'à une pression de, par exemple, 0,1 MPa, dans le détendeur JT35 de la cinquième branche R35, avant de traverser à nouveau, en ordre inversé, les deuxième et premier échangeurs de chaleur HX11, HX10 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur pour y absorber de la chaleur, et être ensuite reconduite vers les compresseurs C3.

[0068] La fraction gazeuse du troisième réfrigérant dirigée à travers la sixième branche R36 du troisième circuit de réfrigérant R3 peut être refroidie jusqu'à une température de, par exemple, 82 K en traversant les deuxième et troisième échangeurs de chaleur HX11, HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, pour être ensuite détendue, en particulier de manière sensiblement adiabatique, jusqu'à une pression de, par exemple, 0,1 MPa, dans le détendeur JT36 de la sixième branche R36, avant de traverser à nouveau, en ordre inversé, les troisième, deuxième et premier échangeurs de chaleur HX12, HX11, HX10 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur pour y absorber de la chaleur, et être ensuite reconduite vers les compresseurs C3.

[0069] Dans le premier circuit de réfrigérant R1, le premier réfrigérant peut être comprimé, par exemple de 0,1 MPa à 4 MPa, dans les compresseurs C1, et ensuite refroidi jusqu'à, par exemple, 90 K, en traversant les premier, deuxième et troisième échangeurs de chaleur HX10, HX11, HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur. Il peut ensuite être détendu, en particulier de manière sensiblement adiabatique, dans l'unique détendeur JT1 du premier circuit de réfrigérant R1, de manière à en réduire sa température jusqu'à, par exemple, 78 K et le liquéfier au moins en partie avant d'arriver dans la cuve T1.

[0070] Une fraction gazeuse du premier réfrigérant peut sortir de la cuve T1 pour traverser, en ordre inversé, les troisième, deuxième et premier échangeurs de chaleur HX12, HX11, HX10 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur pour y absorber de la chaleur avant de retourner aux compresseurs C1 du premier circuit de réfrigérant.

[0071] Dans le deuxième circuit de réfrigérant R2, le deuxième réfrigérant peut circuler de manière sensiblement analogue au premier mode de réalisation, tandis que l'hydrogène gazeux introduit dans le circuit d'alimentation en hydrogène H peut d'abord être refroidi jusqu'à, par exemple, 90 K, en traversant

les premier, deuxième et troisième échangeurs de chaleur HX10, HX11 et HX12 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur, pour être ensuite refroidi jusqu'à 80 K en traversant le dernier échangeur de chaleur HX13 du premier ensemble d'échangeurs de chaleur qui, comme dans le premier mode de réalisation, peut
5 être un échangeur catalytique apte à opérer, en tant qu'échangeur catalytique, une conversion catalytique ortho-para du débit d'alimentation pour y augmenter le taux de para-hydrogène par exemple de 25 à 48%. Les étapes subséquentes du refroidissement et liquéfaction de l'hydrogène circulant à travers le circuit d'alimentation en hydrogène H peuvent être analogues à celles du premier mode
10 de réalisation.

[0072] Quoique la présente invention ait été décrite en se référant à des modes de réalisation spécifiques, il est évident que des différentes modifications et changements peuvent être effectués sur ces exemples sans sortir de la portée générale de l'invention telle que définie par les revendications. En outre, des
15 caractéristiques individuelles des différents modes de réalisation évoqués peuvent être combinées dans des modes de réalisation additionnels. Par conséquent, la description et les dessins doivent être considérés dans un sens illustratif plutôt que restrictif.

Revendications

- [Revendication 1] Procédé de liquéfaction de l'hydrogène, comprenant au moins :
- 5 une étape de pré-refroidissement, dans laquelle un débit d'alimentation en hydrogène est refroidi par un premier réfrigérant,
une étape de refroidissement, dans laquelle le débit d'alimentation en hydrogène est refroidi par un deuxième réfrigérant, et
une étape de détente, en particulier de détente sensiblement adiabatique, du
10 débit d'alimentation en hydrogène,
et dans lequel chacun des premier et deuxième réfrigérants est successivement soumis à au moins une compression et à au moins une détente afin de le refroidir, et une phase liquide du premier réfrigérant refroidit le deuxième réfrigérant entre au moins trois étages d'une
15 compression du deuxième réfrigérant pour que le deuxième réfrigérant ne dépasse pas une température de 150 K, de préférence 113 K, lors de ladite compression du deuxième réfrigérant.
- [Revendication 2] Procédé de liquéfaction de l'hydrogène suivant la
20 revendication 1, dans lequel le premier réfrigérant comprend de l'azote et/ou de l'argon.
- [Revendication 3] Procédé de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une
25 quelconque des revendications 1 ou 2, dans lequel la phase liquide du premier réfrigérant refroidit le deuxième réfrigérant en amont de chacun desdits au moins trois étages de la compression du deuxième réfrigérant.
- [Revendication 4] Procédé de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une
30 quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le deuxième réfrigérant comprend de l'hydrogène, du néon et/ou de l'hélium.

[Revendication 5] Procédé de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel le deuxième réfrigérant est divisé en un premier flux qui est soumis à une détente pour le refroidir et un deuxième flux qui est refroidi par le premier flux du deuxième réfrigérant après la détente du premier flux du deuxième réfrigérant.

[Revendication 6] Procédé de liquéfaction de l'hydrogène suivant la revendication 5, dans lequel le deuxième flux du deuxième réfrigérant est soumis à une détente, en particulier à une détente sensiblement adiabatique, après avoir été refroidi par le premier flux du deuxième réfrigérant.

[Revendication 7] Procédé de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel le premier réfrigérant est divisé en un premier flux qui est soumis à une détente pour le refroidir et un deuxième flux qui est refroidi par le premier flux du premier réfrigérant après la détente du premier flux du premier réfrigérant.

[Revendication 8] Procédé de liquéfaction de l'hydrogène suivant la revendication 7, dans lequel le deuxième flux du premier réfrigérant est soumis à une détente, en particulier à une détente sensiblement adiabatique, après avoir été refroidi par le premier flux du premier réfrigérant.

[Revendication 9] Procédé de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel le débit d'alimentation en hydrogène est refroidi aussi par un troisième réfrigérant pendant l'étape de pré-refroidissement.

[Revendication 10] Installation de liquéfaction de l'hydrogène comprenant au moins :
un circuit (H) d'alimentation en hydrogène,
un premier circuit de réfrigérant (R1) contenant un premier réfrigérant,
un deuxième circuit de réfrigérant (R2) contenant un deuxième réfrigérant,

un premier ensemble d'échangeurs de chaleur (HX10, HX11, HX12, HX13) traversés par le circuit d'alimentation en hydrogène (H) et par le premier circuit de réfrigérant (R1),

un deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur (HX21, HX22, HX23, HX24, HX25, HX26) traversés par le deuxième circuit de réfrigérant (R2) et par le circuit d'alimentation en hydrogène (H) en aval du premier ensemble d'échangeurs de chaleur (HX10, HX11, HX12, HX13), et

un détendeur, par exemple une vanne de détente adiabatique (JTH), traversé par le circuit d'alimentation en hydrogène (H) en aval du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur (HX21, HX22, HX23, HX24, HX25, HX26),

dans laquelle le premier circuit de réfrigérant (R1) comporte un ou plusieurs compresseurs (C1) et un ou plusieurs détendeurs (E1, JT1), et le deuxième circuit de réfrigérant (R2) comprend au moins trois compresseurs (C21, C22, C23, C24) et un dispositif de refroidissement comprenant plusieurs échangeurs intermédiaires (IC) intercalés entre lesdits au moins trois compresseurs (C21, C22, C23, C24) du deuxième circuit de réfrigérant (R2) de manière à effectuer au moins trois compressions du deuxième réfrigérant sans dépasser une température de 150 K, de préférence 113 K, et un ou plusieurs détendeurs (JT2, E21, E22, E23), le dispositif de refroidissement étant configuré pour refroidir le deuxième réfrigérant dans le deuxième circuit de réfrigérant (R2) avec une phase liquide du premier réfrigérant dans le premier circuit de réfrigérant (R1), en particulier dans une cuve (T1) du premier circuit de réfrigérant (R1).

[Revendication 11] Installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant la revendication 10, dans laquelle un desdits échangeurs intermédiaires (IC) est disposé en amont de chacun desdits au moins trois compresseurs (C21, C22, C23, C24) du deuxième circuit de réfrigérant.

[Revendication 12] Installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une quelconque des revendications 10 ou 11, dans laquelle lesdits au moins trois compresseurs (C21, C22, C23, C24) du deuxième circuit de réfrigérant (R2) sont à paliers magnétiques, en particulier à paliers magnétiques actifs.

5

[Revendication 13] Installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une quelconque des revendications 10 à 12, dans laquelle lesdits au moins trois compresseurs (C21, C22, C23, C24) du deuxième circuit de réfrigérant (R2) sont des compresseurs centrifuges.

10

[Revendication 14] Installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une quelconque des revendications 10 à 13, dans laquelle au moins un échangeur de chaleur (HX13, HX21, HX22, HX23, HX24, HX25, HX26) du premier ensemble d'échangeurs de chaleur ou du deuxième ensemble d'échangeurs de chaleur est un échangeur catalytique.

15

[Revendication 15] Installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une quelconque des revendications 10 à 14, dans laquelle le deuxième circuit de réfrigérant (R2) comporte un embranchement (S2), en aval desdits au moins trois compresseurs (C21, C22, C23, C24) du deuxième circuit de réfrigérant (R2), avec une première branche (R21) comportant un ou plusieurs desdits détendeurs (E21, E22, E23) du deuxième circuit de réfrigérant (R2) et traversant en aval au moins un des échangeurs de chaleur (HX21, HX22, HX23, HX24) du deuxième ensemble, et une deuxième branche (R22) traversant au moins un des échangeurs de chaleur (HX21, HX22, HX23, HX24, HX25, HX26) du deuxième ensemble avant de rejoindre la première branche (R21) du deuxième circuit de réfrigérant (R2) en amont desdits compresseurs (C21, C22, C23) du deuxième circuit de réfrigérant (R2).

20

25

30

[Revendication 16] Installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une quelconque des revendications 10 à 15, dans laquelle le premier circuit de réfrigérant (R1) comporte un embranchement (S1), en aval des compresseurs

(C1) du premier circuit de réfrigérant, avec une première branche (R11) comportant au moins un desdits détendeurs (E1) du premier circuit de réfrigérant (R1) et traversant en aval au moins un des échangeurs de chaleur (HX12) du premier ensemble d'échangeurs de chaleur (HX11, HX12, HX13),
5 et une deuxième branche (R12) traversant au moins un des échangeurs de chaleur (HX12, HX13) du premier ensemble d'échangeurs de chaleur (HX11, HX12, HX13) avant de rejoindre la première branche (R11) du premier circuit de réfrigérant (R1) en amont des compresseurs (C1) du premier circuit de réfrigérant (R1).

10

[Revendication 17] Installation de liquéfaction de l'hydrogène suivant l'une quelconque des revendications 10 à 16, comportant en outre un troisième circuit de réfrigérant (R3) contenant un troisième réfrigérant et traversant aussi un ou plusieurs échangeurs de chaleur (HX10, HX11, HX12) du premier
15 ensemble d'échangeurs de chaleur (HX10, HX11, HX12, HX13).

.....