

DISPOSITIF ET PROCÉDÉ DE PRÉ-REFROIDISSEMENT D'UN FLUX D'UN GAZ

Domaine technique de l'invention

La présente invention vise un dispositif de pré-refroidissement d'un flux d'un gaz et un
5 procédé de pré-refroidissement d'un flux d'un gaz. Elle s'applique, par exemple, au domaine du refroidissement d'un gaz, préalablement à sa liquéfaction, et en particulier d'hydrogène.

État de la technique

Le procédé de liquéfaction se divise en trois grands blocs technologiques de
10 température : la compression, le pré-refroidissement et la réfrigération. Le pré-refroidissement a pour but de baisser les températures d'entrée situées entre 273 K et 320 K du fluide d'intérêt et du fluide servant à la réfrigération dans le bloc suivant, jusqu'à une température dite de pré-refroidissement située entre 78 K et 120 K.

On connaît les systèmes antérieurs suivants :

15 - Historiquement, l'opération de pré-refroidissement est réalisée à l'aide d'azote liquide s'écoulant à contre-sens dans un échangeur de chaleur. Celui-ci entre à une température de 78 K environ, sort à température ambiante et est rejeté dans l'atmosphère.

- Un autre procédé connu s'attache à recycler l'azote utilisé en le refroidissant à l'aide d'une série de compressions, refroidissement avec une détente finale permettant de diminuer
20 la température du gaz jusqu'à environ 80 K. À l'aide d'échangeur de chaleur, les fluides à refroidir sont amenés à environ 80 K également.

- Une amélioration de cette boucle préconise d'effectuer plusieurs détente au cours du refroidissement permettant d'optimiser l'apport de froid au sein des échangeurs.

- Enfin, un procédé connu sous la dénomination de « MRC » (pour Mixed-Refrigerant
25 Cycle, traduit par « Cycle de réfrigération mixte ») utilise comme réfrigérant un mélange d'hydrocarbures et d'azote dont la composition varie selon les publications et brevets. Par le même principe opératoire de compression, refroidissement, détente, le réfrigérant est refroidi jusqu'à environ 110 K. À l'aide d'échangeur de chaleur, les fluides à refroidir sont amenés à environ 110 K également.

30 Tous ces systèmes existants présentent des inconvénients :

La boucle ouverte d'azote liquide présente l'inconvénient d'impliquer une gestion
logistique de son approvisionnement et stockage en azote et de présenter des performances
énergétiques peu élevées (environ de 3,5 à 4,5 kWh/kg LH2). Son atout économique et
pratique est justifié dans le cadre de petite production inférieure à 5 tonnes par jour mais est
35 non viable et opérationnellement complexe au-delà. Au-delà d'une certaine capacité, par
exemple supérieure à 5 ou 10 tonnes par jour et suivant le choix de la technologie, le besoin

en quantité d'azote liquide ne convient pas à une chaîne d'approvisionnement économiquement viable.

Les trois autres solutions sont toutes des alternatives de la solution de boucle ouverte d'azote en ce qu'elles opèrent en cycle fermé, évitant l'ensemble des problématiques citées
5 précédemment.

La solution de cycle d'azote fermé, et son amélioration, nécessitent des investissements élevés en équipements, notamment les compresseurs, en raison de leur débit élevé d'azote.

On connaît les demandes de brevet US 5 579 655 et US 2019/063 824 qui divulguent
10 des dispositifs, en cycle d'azote fermé, de pré-refroidissement de l'hydrogène. Cependant, ces dispositifs nécessitent l'utilisation d'azote liquide, séparé de l'azote gazeux grâce à un séparateur de phase, dans le flux de fluide réfrigérant.

On connaît également les demandes de brevet US 2015/204 603 et US 2014/245 780 qui divulguent des dispositifs, en cycle d'azote fermé, de liquéfaction de gaz naturel afin
15 d'obtenir du gaz naturel liquéfié. Cependant, ces dispositifs ne permettent pas de réaliser un pré-refroidissement sans liquéfaction du gaz naturel.

Enfin, la solution MRC optimise l'efficacité énergétique du cycle mais ajoute une complexité dans la gestion des nombreux constituants du réfrigérant allant de 4 à 15. Ceci est notamment dû au fait que la composition est changeante tout au long de la durée d'utilisation
20 du procédé en raison des fuites. Il faut alors reconstituer la composition initiale en introduisant les divers hydrocarbures qu'il aura fallu préalablement stocker. Par ailleurs, les fuites de gaz hydrocarbures sont des facteurs importants d'émission de gaz à effet de serre.

Ainsi, il n'existe pas aujourd'hui de solution simple du point de vue de l'approvisionnement de fluide refroidissant. Il n'existe pas, non plus de solution efficace et
25 économique de pré-refroidissement de fluide, notamment de gaz, et de l'hydrogène en particulier.

Présentation de l'invention

La présente invention vise à remédier à tout ou partie de ces inconvénients.

30 À cet effet, selon un premier aspect, la présente invention vise un dispositif de pré-refroidissement d'un flux d'un gaz, qui comporte :

- en aval d'un premier compresseur de flux réfrigérant, un premier détendeur d'au moins une partie d'un flux gazeux comportant au moins de l'azote, dit « flux réfrigérant »,
- un séparateur du flux réfrigérant gazeux, en aval du premier compresseur, en deux
35 flux gazeux :
 - un flux réfrigérant dit « à moyenne pression » et
 - un flux réfrigérant dit « à basse pression »,

- un premier échangeur de chaleur entre le flux du gaz à pré-refroidir et au moins le flux réfrigérant gazeux à moyenne pression comportant au moins de l'azote,
- un deuxième détendeur du flux réfrigérant gazeux à basse pression,
- un deuxième échangeur de chaleur entre le flux d'un gaz et le flux réfrigérant gazeux
- 5 à basse pression détendu en sortie du deuxième détendeur,
- un troisième échangeur de chaleur entre le flux d'un gaz et le flux réfrigérant gazeux à basse pression en sortie du deuxième échangeur de chaleur et
- au moins un premier compresseur du flux réfrigérant gazeux à basse pression détendu et du flux réfrigérant gazeux à moyenne pression en sortie du premier échangeur de
- 10 chaleur pour former le flux réfrigérant gazeux à haute pression.

Grâce à ces dispositions, le dispositif objet de la présente invention réalise le pré-refroidissement dans une boucle duale en pression. En procédant ainsi, le flux réfrigérant à pression moyenne permet de réduire la destruction d'énergie (et donc de diminuer les pertes d'énergie) s'effectuant dans le premier échangeur dû à un écart très important entre la

15 température d'entrée du fluide froid et la température de sortie du fluide chaud. En procédant avec une fusion des flux à moyenne et à basse pression avant le dernier étage de compression, l'invention permet d'éviter l'intégration d'un compresseur supplémentaire pour ramener le flux de moyenne à haute pression.

L'invention présente un intérêt dans les cas de production nécessitant une autonomie de fonctionnement car elle s'affranchit d'un approvisionnement régulier en azote liquide. De

20 manière générale, la technologie devient intéressante lorsque le coût d'achat et de transport de l'azote liquide est supérieur au surcoût d'équipement dû à l'invention.

Par ailleurs, la solution présente l'avantage de réduire la consommation électrique ce qui s'avère être un atout dégageant deux tendances :

- 25 - plus la capacité est importante et plus la technologie est intéressante et
- plus le coût d'achat d'électricité est important et plus la technologie est intéressante.

Enfin la solution présente l'avantage de conserver une utilisation d'azote dont les aspects toxicité et sécurité présentent des dangers moindres que ceux des réfrigérants mixtes à base d'hydrocarbures. Ainsi l'invention est également mieux adaptée pour un déploiement

30 en milieu péri-urbain.

Dans des modes de réalisation, le séparateur est positionné en aval d'un passage du flux réfrigérant issu du premier compresseur dans le premier échangeur, le premier détendeur étant positionné entre le premier échangeur et le séparateur.

Dans des modes de réalisation, le séparateur est positionné en amont du passage du

35 flux réfrigérant issu du premier compresseur dans le premier échangeur, le détendeur étant configuré pour détendre le flux réfrigérant à moyenne pression, ledit détendeur étant positionné entre le séparateur et le premier échangeur.

Ces modes de réalisation réduisent le débit d'azote utilisé (et diminuent encore la taille des compresseurs et la taille des échangeurs). En revanche, il faut alors deux systèmes de détente, l'un à un étage pour le flux à moyenne pression et l'autre à double étage pour le flux à basse pression.

5 Dans des modes de réalisation, le procédé objet de la présente invention comporte, en amont du premier compresseur, un ensemble d'au moins un deuxième compresseur du flux de réfrigérant à basse pression en sortie du premier échangeur de chaleur, l'ensemble d'au moins un deuxième compresseur étant configuré pour que le flux de réfrigérant à basse pression soit porté à une pression équivalente à la pression du flux réfrigérant à moyenne
10 pression en sortie du premier échangeur de chaleur.

Cette solution permet également de réduire le débit volumique des compresseurs de l'ensemble de compresseurs de 30% et donc de réduire la consommation énergétique d'autant (présentant par exemple une « Specific Energy Consumption », abrégée SEC et traduite par consommation spécifique d'énergie, d'environ 1,8 kWh/kg LH2) et l'investissement initial en
15 équipement. Le prix de la section complète de compression de l'azote avec un compresseur est moins élevé que celui de deux compresseurs à plus petits débits dédiés respectivement aux flux moyenne et basse pression.

Dans des modes de réalisation, le troisième échangeur de chaleur est un échangeur catalytique. Dans des variantes, le premier échangeur n'est pas un échangeur catalytique et
20 le deuxième échangeur et le troisième échangeur sont réunis en un échangeur unique.

Dans des modes de réalisation, le procédé objet de la présente invention comporte un mélangeur du flux réfrigérant à basse pression détendu et du flux réfrigérant à moyenne pression en sortie du premier échangeur de chaleur pour former un flux réfrigérant unitaire, le flux unitaire étant fourni au premier compresseur.

25 Ces modes de réalisation permettent d'éviter l'intégration d'un compresseur supplémentaire pour ramener le flux de moyenne à haute pression.

Dans des modes de réalisation, le premier compresseur est configuré pour produire un flux réfrigérant à haute pression présentant une pression comprise entre 40 et 60 bara.

Ces modes de réalisation présentent des conditions opératoires optimales pour le pré-
30 refroidissement de l'hydrogène.

Dans des modes de réalisation, le premier détendeur est configuré pour produire un flux réfrigérant à moyenne pression présentant une pression comprise entre 15 et 23 bara.

Ces modes de réalisation présentent des conditions opératoires optimales pour la liquéfaction de l'hydrogène.

35 Dans des modes de réalisation, le deuxième détendeur est configuré pour produire un flux réfrigérant à basse pression présentant une pression comprise entre 1 et 2 bara.

Ces modes de réalisation présentent des conditions opératoires optimales pour la liquéfaction de l'hydrogène.

Dans des modes de réalisation, le procédé objet de la présente invention comporte un capteur de débit de flux d'un gaz et un régulateur du débit de flux réfrigérant, le régulateur du débit étant configuré pour que le débit de flux réfrigérant soit égal de 26 à 40 fois le débit du gaz.

Ces modes de réalisation présentent des conditions opératoires optimales pour la liquéfaction de l'hydrogène.

Dans des modes de réalisation, le gaz pré-refroidi est du dihydrogène.

Dans des modes de réalisation, le gaz pré-refroidi présente une température comprise entre 70 K et 120 K.

Dans des modes de réalisation, le gaz pré-refroidi présente une température comprise entre 78 K et 82 K.

Selon un deuxième aspect, la présente invention vise un procédé de pré-refroidissement d'un flux d'un gaz, qui comporte :

- en aval d'une première étape de compression d'un flux gazeux comportant au moins de l'azote, dit « flux réfrigérant », une première étape de détente d'au moins une partie du flux réfrigérant gazeux,
- une étape de séparation du flux réfrigérant gazeux, issu de la première étape de compression, en deux flux gazeux :
 - un flux réfrigérant dit « à moyenne pression » et
 - un flux réfrigérant dit « à basse pression »,
 - une première étape d'échange de chaleur entre le flux d'un gaz à pré-refroidir et au moins le flux réfrigérant gazeux à moyenne pression comportant au moins de l'azote,
 - une deuxième étape de détente du flux réfrigérant gazeux à basse pression,
 - une deuxième étape d'échange de chaleur entre le flux d'un gaz et le flux réfrigérant gazeux à basse pression détendu en sortie de la deuxième étape de détente,
 - une troisième étape d'échange de chaleur entre le flux de gaz et le flux réfrigérant gazeux à basse pression en sortie de la deuxième étape d'échange de chaleur et
 - au moins une première étape de compression du flux réfrigérant gazeux à basse pression détendu et du flux réfrigérant gazeux à moyenne pression en sortie de la première étape d'échange de chaleur pour former le flux réfrigérant gazeux à haute pression, le flux réfrigérant gazeux à haute pression étant fourni à la première étape d'échange de chaleur.

Les avantages du procédé objet de la présente invention sont équivalents aux avantages du dispositif objet de la présente invention.

Brève description des figures

D'autres avantages, buts et caractéristiques particulières de l'invention ressortiront de la description non limitative qui suit d'au moins un mode de réalisation particulier du dispositif et du procédé objets de la présente invention, en regard des dessins annexés, dans lesquels :

- La figure 1 représente, schématiquement, un premier mode de réalisation particulier du dispositif objet de la présente invention,
- La figure 2 représente, schématiquement et sous forme d'un logigramme, une succession d'étapes particulière du procédé objet de la présente invention,
- La figure 3 représente, schématiquement, un deuxième mode de réalisation particulier du dispositif objet de la présente invention et
- La figure 4 représente, schématiquement, un troisième mode de réalisation particulier du dispositif objet de la présente invention.

Description des modes de réalisation

La présente description est donnée à titre non limitatif, chaque caractéristique d'un mode de réalisation pouvant être combinée à toute autre caractéristique de tout autre mode de réalisation de manière avantageuse.

On note dès à présent que les figures ne sont pas à l'échelle.

On note ici que le fluide à refroidir est préférentiellement un gaz et, encore plus préférentiellement de l'hydrogène. On note que le fluide à refroidir peut également être de l'azote, du néon, ou de l'hélium sous forme gazeuse. Dans la suite de la description, lorsque l'on mentionne de l'hydrogène, il s'agit du gaz à refroidir. L'hydrogène peut être remplacé par de l'azote, du néon, ou de l'hélium.

On note ici qu'un gaz refroidi se réfère à un gaz présentant une température comprise entre 70 K et 120 K et préférentiellement entre 78 K et 82 K.

On appelle « flux comportant au moins de l'azote » tout flux de fluide comportant au moins 75% d'azote. Un tel flux peut être de l'air, par exemple, ou être constitué d'azote pur.

Le terme « flux gazeux » s'interprète au sens large et se réfère à un flux de fluide présent à l'état gazeux ou supercritique. Selon la nature du fluide, l'état supercritique est atteint lorsque les conditions de température et de pression sont chacune supérieure aux valeurs définies dans un diagramme de phase. Les conditions de température et de pression délimitant l'état supercritique selon la nature du fluide sont résumées dans le tableau 1 ci-dessous :

Gaz	T _c (K)	P _c (bara)
He (hélium)	5,15	2,27
H ₂ (hydrogène)	33	13
Ne (néon)	44	27,5

N ₂ (azote)	126	34
O ₂ (oxygène)	155	50,43
Ar (argon)	151	49
CH ₄ (méthane)	190	46
CO (monoxyde de carbone)	132	35

T_c et P_c correspondent respectivement à la température critique et la pression critique.

Par exemple, l'azote présentant une température de 221 K à 50 bara est à l'état supercritique, tandis que l'azote présentant une température de 221 K à 33 bara est à l'état gazeux.

5 On observe, sur la figure 1, qui n'est pas à l'échelle, une vue schématique d'un mode de réalisation du dispositif 100 objet de la présente invention.

On note que ce dispositif 100 forme le dispositif de pré-refroidissement d'un système (non référencé) plus large comportant les systèmes de transport, de refroidissement et de compression du fluide à pré-refroidir. Dans la figure 1, ce système comporte :

10 - une entrée 1025 pour fluide à refroidir, le flux de fluide 120 traversant successivement le premier échangeur 105 de chaleur, le troisième échangeur 115 de chaleur et le deuxième échangeur 110 de chaleur,

- un étage de refroidissement 1010 du fluide avec deux sorties :

15 - une sortie pour fluide de refroidissement, pouvant être le fluide à refroidir, à basse pression 1020 et

- une sortie pour fluide de refroidissement à moyenne pression 1015,

les flux de fluide de refroidissement à basse pression 1020 et à moyenne pression 1015 traversant successivement le deuxième échangeur 110 de chaleur, le troisième échangeur 115 de chaleur et le premier échangeur 105 de chaleur avant d'atteindre un étage

20 1005 de compression et

- ledit étage de compression comportant une sortie pour fluide de refroidissement à haute pression 1030,

25 le flux de fluide de refroidissement à haute pression traversant successivement le premier échangeur 105 de chaleur, le troisième échangeur 115 de chaleur et le deuxième échangeur 110 de chaleur.

On note que des dispositifs d'un même type, par exemple compresseurs ou échangeurs, peuvent ne pas être des dispositifs distincts mais des étages d'un dispositif unique pour tout ou partie des dispositifs d'un type donné. Par exemple, le premier échangeur 105, le deuxième échangeur 110 et le troisième échangeur 115 peuvent correspondre à trois
30 étages distincts d'un échangeur unique.

On note que, dans des variantes, le deuxième échangeur 110 est absent du dispositif 100.

Le dispositif 100 de pré-refroidissement d'un flux d'un fluide comporte :

- en aval d'un premier compresseur 155 de flux réfrigérant, un premier détendeur 130 d'au moins une partie d'un flux comportant au moins de l'azote, dit « flux réfrigérant »,

5 - un séparateur 135 du flux réfrigérant 125, en aval du premier compresseur 155, en deux flux :

 - un flux 140 réfrigérant dit « à moyenne pression » et

 - un flux 145 réfrigérant dit « à basse pression »,

 - un premier échangeur 105 de chaleur entre le flux 120 de fluide à pré-refroidir et au moins le flux 140 réfrigérant à moyenne pression comportant au moins de l'azote,

10 - un deuxième détendeur 150 du flux réfrigérant à basse pression,

 - un deuxième échangeur 110 de chaleur entre le flux d'un fluide et le flux réfrigérant à basse pression détendu en sortie du deuxième détendeur,

 - un troisième 115 échangeur de chaleur entre le flux d'un fluide et le flux réfrigérant à basse pression en sortie du deuxième échangeur de chaleur et

15 - au moins un premier compresseur 155 du flux réfrigérant à basse pression détendu et du flux réfrigérant à moyenne pression en sortie du premier échangeur de chaleur pour former le flux réfrigérant à haute pression.

 Dans le mode de réalisation illustré en figure 1, le séparateur 135 est positionné en aval du passage du flux 125 réfrigérant issu du premier compresseur 155 dans le premier
20 échangeur 105, le détendeur 130 étant positionné entre le premier échangeur 105 et le séparateur 135.

 En sortie du premier échangeur 105 de chaleur, le flux réfrigérant gazeux présente, par exemple, une température de l'ordre de 221 K à 50 bara. On note qu'un flux réfrigérant gazeux comportant au moins de l'azote est à l'état supercritique dans les conditions de température
25 et de pression respectivement égales à 221 K et 50 bara.

 Le premier détendeur 130 est, par exemple, une turbine de détente, ou turbodétendeur (« turboexpander », en anglais). Ce premier détendeur 130 reçoit, en entrée, le flux de réfrigérant à haute pression ayant traversé le premier échangeur 105 pour être refroidi ou pour en diminuer la température après compression.

30 Dans des variantes, le premier détendeur 130 est configuré, par exemple, pour produire un flux réfrigérant gazeux à moyenne pression présentant une pression comprise entre 15 et 23 bara.

 Par exemple, la détente opérée porte le flux réfrigérant gazeux à une pression de 19 bara et à une température de 169 K. On note qu'un flux réfrigérant gazeux détendu et
35 comportant au moins de l'azote est à l'état gazeux dans les conditions de pression et de température respectivement égales à 19 bara et 169 K.

Le flux quittant le premier détendeur 130 est séparé dans le séparateur 135. Ce séparateur 135 est, par exemple, un té muni de vannes permettant l'asservissement du séparateur 135. Dans des variantes, tout type de séparateur connu d'une personne du métier peut être utilisé selon la nature d'implémentation du dispositif 100.

5 Ce séparateur 135 est défini, fonctionnellement, par sa capacité à former les deux flux suivants :

- un flux 140 réfrigérant dit « à moyenne pression » et
- un flux 145 réfrigérant dit « à basse pression », dont la basse pression est acquise après passage dans le deuxième détendeur 150.

10 Le ratio de séparation entre les flux, c'est-à-dire la proportion de flux à moyenne pression par rapport au flux à basse pression peut être fixe ou variable. Ce ratio peut être asservi en fonction d'un débit mesuré par un capteur (non représenté) de débit du flux 140 à moyenne pression.

Le flux 140 réfrigérant à moyenne pression est renvoyé dans le premier échangeur 105 de chaleur pour participer aux échanges y ayant lieu, tandis que le flux 145 réfrigérant à basse pression est fourni au deuxième détendeur 150.

Ce deuxième détendeur est, par exemple, une turbine de détente, ou turbodétendeur.

Dans des variantes, le deuxième détendeur 150 est configuré pour produire, par exemple, un flux réfrigérant gazeux à basse pression présentant une pression comprise entre 1 et 2 bara.

Par exemple, le deuxième détendeur 150 est configuré pour porter le flux réfrigérant gazeux à basse pression présentant une pression de 1,4 bara et une température de 84 K. On note qu'un flux réfrigérant gazeux à basse pression comportant au moins de l'azote est à l'état gazeux dans les conditions de pression et de température respectivement égales à 1,4 bara et 84 K.

Une fois porté à basse pression, le flux 145 réfrigérant à basse pression est fourni au deuxième échangeur 110 de chaleur.

Ce deuxième échangeur 110 de chaleur est, par exemple, un échangeur à plaques, à spirales, à tubes, à faisceau tubulaire ou à ailettes.

30 Une fois que le flux 145 réfrigérant à basse pression a traversé le deuxième échangeur 110 de chaleur, ce flux 145 réfrigérant à basse pression est dirigé vers le troisième échangeur 115 de chaleur.

Ce troisième échangeur 115 de chaleur est, par exemple, un échangeur à plaques, à spirales, à tubes, à faisceau tubulaire ou à ailettes. Dans des variantes, le troisième échangeur 115 de chaleur est un échangeur catalytique.

L'hydrogène est ainsi converti par réaction physico-chimique dite catalytique et souvent désignée par « catalyse ». Cette catalyse de l'hydrogène n'est classiquement effectuée que

pour des températures inférieures à 100 K. C'est ce qui implique que dans ce dispositif 100, si conversion catalytique il y a, seul le troisième échangeur est catalytique.

Une fois que le flux 145 réfrigérant à basse pression a traversé le troisième échangeur 115 de chaleur, ce flux 145 réfrigérant à basse pression est dirigé vers le premier échangeur
5 105 de chaleur.

Ce premier échangeur 105 de chaleur est, par exemple, un échangeur à plaques, à spirales, à tubes, à faisceau tubulaire ou à ailettes.

Une fois que le flux 145 réfrigérant à basse pression a traversé le premier échangeur 105 de chaleur, ce flux 145 réfrigérant à basse pression est dirigé vers le premier compresseur
10 155, de manière conjointe au flux 140 réfrigérant à moyenne pression en sortie du premier échangeur 105 de chaleur.

Le premier compresseur 155 est, par exemple, un turbocompresseur (« turbo-compressor », en anglais), un compresseur mécanique ou alternatif.

Dans des variantes, le premier compresseur 155 est configuré pour produire un flux
15 réfrigérant gazeux à haute pression présentant une pression comprise entre 40 et 60 bara.

Dans des variantes non représentées, le dispositif 100 objet de la présente invention comporte une colonne d'absorption, catalytique ou non, positionnée en sortie du deuxième échangeur 110 dans le sens du fluide à refroidir.

En sortie du premier compresseur 155, le flux 125 réfrigérant à haute pression est
20 formé de nouveau et envoyé vers le premier échangeur 105 de chaleur.

Préférentiellement, dans le dispositif 100 représenté en figure 1, le flux réfrigérant gazeux comportant au moins de l'azote, en aval du premier compresseur 155 et en amont du premier détenteur 130, est à l'état supercritique et présente, par exemple, une pression comprise entre 40 et 60 bara. Ensuite, le flux réfrigérant gazeux comportant au moins de
25 l'azote, en aval du premier détenteur 130, est à l'état gazeux, et présente, par exemple, une pression comprise entre 15 et 23 bara. Dans cet exemple, le flux réfrigérant gazeux à moyenne pression est donc à l'état gazeux. Enfin, le flux réfrigérant gazeux à basse pression comportant au moins de l'azote, en aval du deuxième détenteur 150, est à l'état gazeux, et présente, par exemple, une pression comprise entre 1 et 2 bara.

Dans des modes de réalisation particuliers, tels que celui représenté en figure 1, le
30 dispositif 100 objet de la présente invention comporte, en amont du premier compresseur 155, un ensemble 160 d'au moins un deuxième compresseur 165 du flux de réfrigérant à basse pression en sortie du premier échangeur 105 de chaleur, l'ensemble d'au moins un deuxième compresseur étant configuré pour que le flux de réfrigérant à basse pression soit porté à une
35 pression équivalente à la pression du flux réfrigérant à moyenne pression en sortie du premier échangeur de chaleur.

Chaque deuxième compresseur 165 peut être d'un type identique ou distinct, de type turbocompresseur, mécanique ou alternatif.

Dans des variantes non représentées, le dispositif 100 objet de la présente invention comporte un capteur (non représenté) de la pression du flux réfrigérant à moyenne pression, l'ensemble 160 de compression étant actionné en fonction de la pression captée.

Dans des modes de réalisation particuliers, tels que celui représenté en figure 1, le dispositif 100 objet de la présente invention comporte un mélangeur 170 du flux réfrigérant à basse pression détendu et du flux réfrigérant à moyenne pression en sortie du premier échangeur 105 de chaleur pour former un flux réfrigérant unitaire, le flux unitaire étant fourni au premier compresseur 155.

Le mélangeur 170 est, par exemple, une vanne mélangeuse ou une vanne à boisseau trois voies.

Dans des variantes non représentées, le mélangeur 170 est configuré pour mélanger le flux à moyenne pression avec le flux de sortie d'un deuxième compresseur 165 de l'ensemble 160 et pour fournir le flux mélangé à un autre deuxième compresseur 165 de l'ensemble 160.

Dans des modes de réalisation particuliers, tels que celui représenté en figure 1, le dispositif 100 objet de la présente invention comporte un capteur 175 de débit de flux d'un fluide et un régulateur 180 du débit de flux réfrigérant, le régulateur du débit étant configuré pour que le débit de flux réfrigérant soit égal de 26 à 40 fois le débit du fluide. Un tel régulateur 180 est, par exemple, une vanne de régulation de débit actionnée automatiquement.

Le ratio de débits de flux est mesuré en ratio de flux de masse.

Le capteur 175 peut être de tout type de technologie adapté au fluide considéré. Par exemple, ce capteur 175 est un débitmètre électromagnétique.

Dans des variantes non représentées, le dispositif 100 comporte au moins un échangeur de chaleur intermédiaire entre au moins le fluide à refroidir et le flux réfrigérant à basse pression.

Dans des variantes non représentées, le dispositif 100 comporte une pluralité de premiers compresseurs 155, de premiers détendeurs 130 et/ou de deuxièmes détendeurs 150.

Dans des variantes, telles que celle représentée en figure 3, le dispositif 300 de pré-refroidissement d'un flux de fluide met en œuvre un séparateur 305 secondaire du flux à basse pression 145, ledit séparateur 305 secondaire étant positionné en aval du deuxième détendeur 150. Ce séparateur 305 secondaire permet de créer deux flux :

- un flux réfrigérant dit « à basse pression » 315, correspondant au flux 145 de la figure 1, dont la pression est par exemple voisine de 9 bara et
- un flux réfrigérant dit « à très basse pression » 310 fourni à un détendeur 320 supplémentaire en aval, dont la pression est par exemple voisine de 5 bara.

Le flux à basse pression 315 est configuré pour traverser le troisième échangeur 115 et le premier échangeur 105 successivement tandis que le flux réfrigérant à très basse pression 310 traverse, en plus, le deuxième échangeur 110.

En sortie du bloc formé par les échangeurs de chaleur, 105, 110 et 115, les flux sont
5 progressivement réintégrés après un nombre d'étapes de compression correspondant au nombre d'étapes de détente subies au cours du cycle.

Ainsi, le flux à très basse pression 310 est mélangé, dans un mélangeur 325, après une éventuelle compression et le flux résultant est injecté dans un compresseur 330 avant d'être mélangé avec le flux à moyenne pression 140. Le flux résultant est fourni au
10 compresseur 155.

Dans des variantes non représentées, le flux à très basse pression 310 est à nouveau séparé en deux flux, l'un des deux étant injecté dans un détendeur. Les deux flux ainsi séparés traversent alors le deuxième échangeur 110.

Préférentiellement, dans le dispositif 300 représenté en figure 3, le flux réfrigérant
15 gazeux comportant au moins de l'azote, en aval du premier compresseur 155 et en amont du premier détendeur 130, est à l'état supercritique. Ensuite, le flux réfrigérant gazeux comportant au moins de l'azote, en aval du premier détendeur 130, et en amont du compresseur 155 est à l'état gazeux.

La mise en œuvre du dispositif 100 permet, par exemple, d'obtenir un flux de fluide
20 présentant une température de l'ordre de 90 K.

Les conditions opératoires de fonctionnement peuvent ainsi être telles que décrites dans le tableau 2 ci-dessous :

Paramètres	Borne inférieure	Borne supérieure
Pression du flux réfrigérant à basse pression [bara]	1	2
Pression du flux réfrigérant à moyenne pression [bara]	15	23
Pression du flux réfrigérant à haute pression [bara]	40	62
Ratio total d'azote (kg _{azote} /kg _{fluide à refroidir})	26	40
Ratio de séparation des flux moyenne pression vs. basse pression	0,2	0,45
Température de sortie du fluide pré-refroidi par le dispositif 100 [K]	80	100

On observe, en figure 4, schématiquement, une variation du mode de réalisation illustré en figure 1. Dans ce mode de réalisation particulier du dispositif 400 objet de la présente invention, le séparateur 405 est positionné en amont du passage du flux 125 réfrigérant issu du premier compresseur 155 dans le premier échangeur 105, le détendeur 410 étant configuré pour détendre le flux 140 réfrigérant à moyenne pression, ledit détendeur 410 étant positionné entre le séparateur 405 et le premier échangeur 105.

Comme on le comprend, la principale variation tient au fait que le premier échangeur 105 n'est plus mutualisé entre les flux à moyenne et à basse pression, si bien que le deuxième détendeur 150 est, dans ces modes de réalisation, à deux étages. Le deuxième détendeur 150 doit réaliser l'équivalent des opérations du premier détendeur 130 et du deuxième détendeur 150 de la figure 1.

Préférentiellement, dans le dispositif 400 représenté en figure 4, le flux réfrigérant gazeux comportant au moins de l'azote, en aval du premier compresseur 155 et en amont du premier détendeur 410 et du deuxième détendeur 150, est à l'état supercritique. Ensuite, le flux réfrigérant gazeux comportant au moins de l'azote, en aval du premier détendeur 410 et du deuxième détendeur 150, est à l'état gazeux.

On observe, en figure 2, schématiquement, une succession d'étapes particulières du procédé 200 objet de la présente invention. Ce procédé 200 de pré-refroidissement d'un flux d'un fluide, comporte :

- en aval d'une première étape 235 de compression d'un flux comportant au moins de l'azote, dit « flux réfrigérant », une première étape 210 de détente du d'au moins une partie du flux réfrigérant,

- une étape 215 de séparation du flux réfrigérant, issu de la première étape 235, de compression en deux flux :
 - un flux réfrigérant dit « à moyenne pression » et
 - un flux réfrigérant dit « à basse pression »,
 - une première étape d'échange 205 de chaleur entre le flux de fluide à pré-refroidir et au moins le flux réfrigérant à moyenne pression comportant au moins de l'azote,
- une deuxième étape 220 de détente du flux réfrigérant à basse pression,
- une deuxième étape 225 d'échange de chaleur entre le flux d'un fluide et le flux réfrigérant à basse pression détendu en sortie de la deuxième étape de détente,
- une troisième étape 230 d'échange de chaleur entre le flux d'un fluide et le flux réfrigérant à basse pression en sortie de la deuxième étape d'échange de chaleur et
- au moins une première étape 235 de compression du flux réfrigérant à basse pression détendu et du flux réfrigérant à moyenne pression en sortie de la première étape d'échange de chaleur pour former le flux réfrigérant à haute pression, le flux réfrigérant à haute pression étant fourni à la première étape d'échange de chaleur.

La réalisation et la mise en œuvre de ce procédé 200 sont décrites au regard des figures 1, 3 et 4. De même, les variantes des figures 1, 3 et 4 peuvent être transposées, mutatis mutandis, dans le contenu de la figure 2.

REVENDICATIONS

1. Dispositif (100, 400) de pré-refroidissement d'un flux d'un gaz, caractérisé en ce qu'il comporte :

- 5 - en aval d'un premier compresseur (155) de flux réfrigérant, un premier détendeur (130, 410) d'au moins une partie d'un flux gazeux comportant au moins de l'azote, dit « flux réfrigérant »,
 - un séparateur (135, 405) du flux réfrigérant (125) gazeux, en aval du premier compresseur (155), en deux flux gazeux :
- 10 - un flux (140) réfrigérant dit « à moyenne pression » et
 - un flux (145) réfrigérant dit « à basse pression »,
 - un premier échangeur (105) de chaleur entre le flux (120) de gaz à pré-refroidir et au moins le flux (140) réfrigérant gazeux à moyenne pression comportant au moins de l'azote,
 - un deuxième détendeur (150) du flux réfrigérant gazeux à basse pression,
- 15 - un deuxième échangeur (110) de chaleur entre le flux d'un gaz et le flux réfrigérant gazeux à basse pression détendu en sortie du deuxième détendeur,
 - un troisième (115) échangeur de chaleur entre le flux d'un gaz et le flux réfrigérant gazeux à basse pression en sortie du deuxième échangeur de chaleur et
 - au moins un premier compresseur (155) du flux réfrigérant gazeux à basse pression
- 20 détendu et du flux réfrigérant gazeux à moyenne pression en sortie du premier échangeur de chaleur pour former le flux réfrigérant gazeux à haute pression.

2. Dispositif (100) selon la revendication 1, dans lequel le séparateur (135) est positionné en aval d'un passage du flux (125) réfrigérant issu du premier compresseur (155) dans le premier
25 échangeur (105), le premier détendeur (130) étant positionné entre le premier échangeur (105) et le séparateur (135).

3. Dispositif (400) selon la revendication 1, dans lequel le séparateur (405) est positionné en amont du passage du flux (125) réfrigérant issu du premier compresseur (155) dans le premier
30 échangeur (105), le détendeur (410) étant configuré pour détendre le flux (140) réfrigérant à moyenne pression, ledit détendeur (410) étant positionné entre le séparateur (405) et le premier échangeur (105).

4. Dispositif (100, 400) selon l'une des revendications 1 à 3, qui comporte, en amont du premier compresseur (155), un ensemble (160) d'au moins un deuxième compresseur (165) du flux de
35 réfrigérant à basse pression en sortie du premier échangeur (105) de chaleur, l'ensemble d'au moins un deuxième compresseur étant configuré pour que le flux de réfrigérant à basse

pression soit porté à une pression équivalente à la pression du flux réfrigérant à moyenne pression en sortie du premier échangeur de chaleur.

5 5. Dispositif (100, 400) selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel le troisième échangeur (115) de chaleur est un échangeur catalytique.

10 6. Dispositif (100, 400) selon l'une des revendications 1 à 5, qui comporte un mélangeur (170) du flux réfrigérant à basse pression détendu et du flux réfrigérant à moyenne pression en sortie du premier échangeur (105) de chaleur pour former un flux réfrigérant unitaire, le flux unitaire étant fourni au premier compresseur (155).

15 7. Dispositif (100, 400) selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel le premier compresseur (155) est configuré pour produire un flux réfrigérant à haute pression présentant une pression comprise entre 40 et 60 bara.

8. Dispositif (100, 400) selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel le premier détendeur (130) est configuré pour produire un flux réfrigérant à moyenne pression présentant une pression comprise entre 15 et 23 bara.

20 9. Dispositif (100, 400) selon l'une des revendications 1 à 8, dans lequel le deuxième détendeur (150) est configuré pour produire un flux réfrigérant à basse pression présentant une pression comprise entre 1 et 2 bara.

25 10. Dispositif (100, 400) selon l'une des revendications 1 à 9, qui comporte un capteur (175) de débit de flux d'un gaz et un régulateur (180) du débit de flux réfrigérant, le régulateur du débit étant configuré pour que le débit de flux réfrigérant soit égal de 26 à 40 fois le débit du gaz.

30 11. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 10, dans lequel le gaz pré-refroidi est du dihydrogène.

12. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 11, dans lequel le gaz pré-refroidi présente une température comprise entre 70 K et 120 K.

35 13. Dispositif selon la revendication 12, dans lequel le gaz pré-refroidi présente une température comprise entre 78 K et 82 K.

14. Procédé (200) de pré-refroidissement d'un flux d'un gaz, caractérisé en ce qu'il comporte :
- en aval d'une première étape (235) de compression d'un flux gazeux comportant au moins de l'azote, dit « flux réfrigérant », une première étape (210) de détente du d'au moins une partie du flux réfrigérant gazeux,
- 5 - une étape (215) de séparation du flux réfrigérant gazeux, issu de la première étape (235), de compression en deux flux gazeux :
- un flux réfrigérant dit « à moyenne pression » et
 - un flux réfrigérant dit « à basse pression »,
 - une première étape d'échange (205) de chaleur entre le flux de gaz à pré-refroidir et
- 10 au moins le flux réfrigérant gazeux à moyenne pression comportant au moins de l'azote,
- une deuxième étape (220) de détente du flux réfrigérant gazeux à basse pression,
 - une deuxième étape (225) d'échange de chaleur entre le flux d'un gaz et le flux réfrigérant gazeux à basse pression détendu en sortie de la deuxième étape de détente,
 - une troisième étape (230) d'échange de chaleur entre le flux d'un gaz et le flux
- 15 réfrigérant gazeux à basse pression en sortie de la deuxième étape d'échange de chaleur et
- au moins une première étape (235) de compression du flux réfrigérant gazeux à basse pression détendu et du flux réfrigérant gazeux à moyenne pression en sortie de la première étape d'échange de chaleur pour former le flux réfrigérant gazeux à haute pression, le flux réfrigérant gazeux à haute pression étant fourni à la première étape d'échange de chaleur.