

ANNEXE B – SYSTEMES DE LIQUEFACTION DU GAZ NATUREL

Cette annexe présente en détail les différents procédés de liquéfaction du gaz naturel, une étape essentielle à sa transformation en GNL en vue de son transport et de son stockage.

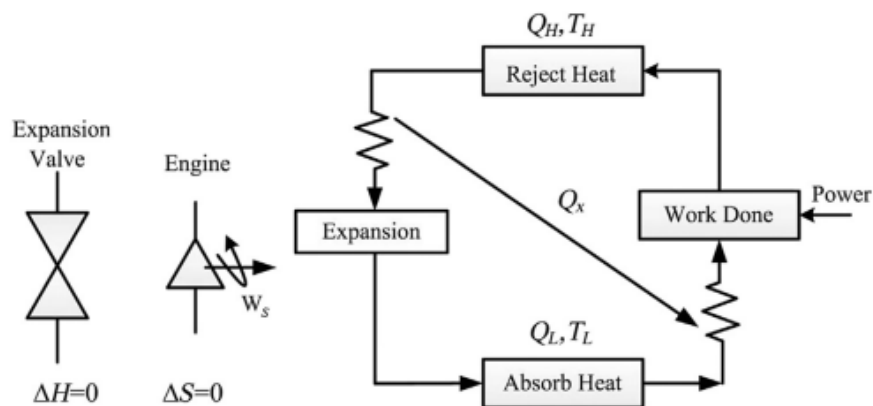
1 Principe général

La liquéfaction des gaz est toujours réalisée en refroidissant le gaz à une température inférieure à sa température critique, de sorte qu'un liquide puisse se former à une pression appropriée, inférieure à la pression critique. Ainsi, la liquéfaction des gaz est un cas particulier de la réfrigération des gaz et ne peut en être dissociée.

Le gaz est d'abord comprimé à une pression élevée à température ambiante à l'aide d'un compresseur. Ce gaz à haute pression est ensuite envoyé dans un échangeur de chaleur régénératif à contre-courant, jusqu'à une vanne de détente ou un moteur d'expansion, comme illustré à la figure suivante.

Avant de se détendre à basse pression, un refroidissement peut avoir lieu et une certaine quantité de liquide se forme. Le gaz froid et à basse pression est ensuite renvoyé à l'entrée du compresseur pour recommencer le cycle.

Le rôle de l'échangeur de chaleur à contre-courant est de réchauffer le gaz à basse pression avant sa recompression, tout en refroidissant simultanément le gaz à haute pression à la température la plus basse possible avant son expansion. Les réfrigérateurs comme les liquéfacteurs fonctionnent selon ce principe fondamental.



Réfrigérateur cryogénique à cycle fermé.

Source : (Mokhatab et al., 2014)

Il existe néanmoins une distinction importante entre les réfrigérateurs et les liquéfacteurs. Dans un processus de réfrigération en continu, il n'y a aucune accumulation de réfrigérant dans une quelconque partie du système. Cela contraste avec un système de liquéfaction de gaz, dans lequel le liquide s'accumule et est extrait.

Ainsi, dans un système de liquéfaction, la masse totale du gaz réchauffé dans l'échangeur de chaleur à contre-courant est inférieure à celle du gaz à refroidir, en raison de la quantité liquéfiée, ce qui crée un déséquilibre du débit dans l'échangeur.

Dans un réfrigérateur, les débits de gaz chaud et de gaz froid dans l'échangeur sont égaux. Cela aboutit à ce qu'on appelle généralement une « condition de flux équilibré » dans l'échangeur de chaleur du réfrigérateur.

Les principes thermodynamiques de la réfrigération et de la liquéfaction sont identiques. Cependant, l'analyse et la conception des deux systèmes sont assez différentes en raison de la condition de flux équilibré dans les réfrigérateurs et de flux déséquilibré dans les liquéfacteurs. La réfrigération préalable nécessaire à la liquéfaction des gaz est réalisée dans un processus thermodynamique, lorsque le gaz de procédé absorbe de la chaleur à des températures inférieures à celle de l'environnement.

Un procédé permettant de produire du froid à des températures correspondant à celles des gaz liquéfiés implique toujours un équipement fonctionnant à température ambiante, dans lequel le gaz est comprimé et la chaleur est rejetée vers un fluide de refroidissement.

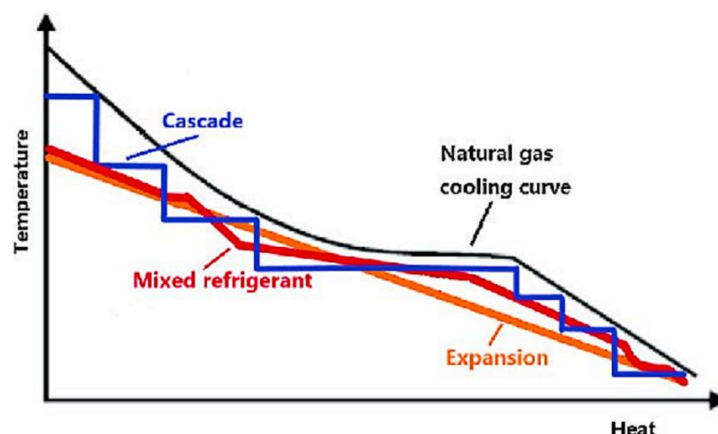
Au cours de ce processus de compression et de refroidissement à température ambiante, l'enthalpie et l'entropie du gaz diminuent, mais pas nécessairement sa température.

Les technologies de liquéfaction sont basées sur des cycles de réfrigération, qui prennent du gaz d'alimentation prétraité chaud et le refroidissent et le condensent à des températures cryogéniques pour obtenir un produit liquide.

Le réfrigérant peut faire partie du gaz naturel d'alimentation (processus à cycle ouvert) ou être un fluide séparé circulant en continu à travers le liquéfacteur ou l'échangeur de chaleur (processus à cycle fermé).

Pour atteindre les températures extrêmement froides ou cryogéniques nécessaires à la production de GNL, du travail doit être fourni dans le(s) cycle(s) de réfrigération via un ou plusieurs compresseurs de réfrigérant, et de la chaleur doit être rejetée du ou des cycles à travers des refroidisseurs à air ou à eau.

En théorie, le procédé de liquéfaction le plus thermodynamiquement efficace est celui avec un réfrigérant ou un système de réfrigérant capable de reproduire la forme de la courbe de refroidissement du gaz naturel à la pression de fonctionnement (voir figure suivante).



Courbe de refroidissement du gaz naturel

Source : (Bassioni & Klein, 2024)

La figure ci-dessus illustre les courbes de refroidissement pour un système de gaz naturel, et les courbes de chauffage différents procédés de liquéfaction : cascade, expansion et mix réfrigérant. Nous détaillerons ces procédés plus loin.

En observant la courbe, on peut noter trois zones dans le procédé de liquéfaction du gaz. Une zone de pré-refroidissement (pre-cooling zone), suivie d'une zone de condensation (liquéfaction), et enfin une zone de sous-refroidissement (sub-cooling).

Toutes ces zones se caractérisent par des pentes différentes de la courbe, ou des chaleurs spécifiques, le long du processus.

Cette courbe de charge associée à un procédé spécifique de liquéfaction du gaz peut être utilisée comme un outil d'optimisation du système de liquéfaction. C'est particulièrement important, car cela va influencer directement la conception du système de liquéfaction du gaz naturel.

La zone de pré-refroidissement (pre-cooling zone) permet de faire baisser la température du gaz sans changement d'état. Le gaz naturel passe d'environ 35–40°C à -30/-40°C. L'énergie retirée est appelée chaleur sensible. Cette zone permet le changement de température la plus large mais le gaz reste à l'état gazeux.

La zone de condensation (liquefaction zone) va permettre de transformer le gaz en liquide, sans baisser beaucoup la température. La température se trouve autour de -100°C à -150°C, selon la composition. Le but est de retirer la chaleur latente de vaporisation et de faire transiter le gaz en liquide. Cette zone de refroidissement est la plus énergivore.

La zone de sous-refroidissement (sub-cooling zone) permet de refroidir encore un peu le liquide en dessous de son point d'ébullition à la pression d'utilisation, le but étant d'éviter l'évaporation partielle pendant le stockage ou le transport et de garantir la stabilité du produit cryogénique. A ce moment, le GNL est refroidi vers -162°C, qui est la température typique de stockage. L'énergie retirée est à nouveau de la chaleur sensible, mais sur du liquide.

Comme énoncé, les principaux composants d'équipement de liquéfaction sont conçus pour correspondre le plus possible à la courbe de refroidissement du gaz en cours de liquéfaction aux différentes zones/étapes du procédé de liquéfaction afin d'obtenir une haute efficacité de réfrigération et de réduire la consommation d'énergie.

Plus la différence de température entre le gaz du procédé et le réfrigérant est petite, plus la surface d'échange thermique nécessaire pour la tâche est grande.

Par conséquent, la conception du procédé de GNL est un exercice d'optimisation entre la sélection et la composition du réfrigérant, la conception de l'échangeur de chaleur et la surface d'échange thermique, ainsi que l'adaptation de la consommation d'énergie du réfrigérant à la capacité du compresseur/driver disponible.

2 Choix du réfrigérant

A partir du principe général expliqué plus haut, le choix du ou des réfrigérants est capital dans le procédé de liquéfaction. En fonction de la température cible de réfrigération, le réfrigérant doit être sélectionné de manière à maximiser l'absorption de chaleur utile tout en minimisant le travail de compression requis (et donc moins de travail à fournir).

Les exigences en termes de capacité de réfrigération jouent donc un rôle important dans l'influence de la méthode de réfrigération et des réfrigérants pouvant être utilisés.

Les réfrigérants sont classés en deux catégories. Le premier groupe comprend les réfrigérants fonctionnant à des températures proches de l'ambiante. Ils sont utilisés dans des réfrigérateurs fonctionnant en boucle fermée.

Les réfrigérants typiques sont des composés inorganiques, des composés halo-carbones et des hydrocarbures. La caractéristique commune de ce type de réfrigérants est qu'ils ont des températures critiques relativement élevées et peuvent être liquéfiés à des températures proches de l'ambiante ou à des températures froides moyennes.

L'autre type est appelé fluides cryogéniques, incluant des gaz cryogéniques tels que le méthane, l'air, l'oxygène, l'azote, etc. Ils ont des températures d'ébullition très basses, généralement inférieures à 120 K.

Les gaz cryogéniques sont utilisés dans des liquéfacteurs ouverts où les produits liquides sont retirés et un flux équivalent de compensation doit être ajouté. C'est principalement ce type de réfrigérant qui est utilisé lors de la liquéfaction du gaz naturel.

Les exigences de base pour les réfrigérants sont les suivantes :

- Les températures critiques ne doivent pas être trop basses, afin qu'ils puissent être liquéfiés à des températures ambiantes ou modérément basses.
- Ils doivent avoir des pressions de saturation appropriées dans la plage de températures de fonctionnement. En général, la pression d'évaporation est préférée proche ou supérieure à la pression atmosphérique pour éviter l'infiltration d'air dans les composants à basse pression ; en parallèle, la pression de condensation ne doit pas être trop élevée, car cela augmenterait le travail du compresseur.
- La capacité frigorifique volumétrique doit être élevée, ce qui permet de réduire la taille du compresseur et le débit de réfrigérant.
- La viscosité et la densité doivent être faibles, ce qui entraîne des pertes de charge réduites dans le système.
- Ils doivent avoir une conductivité thermique élevée, ce qui permet d'augmenter l'efficacité de l'évaporateur et du condenseur, et de réduire la surface nécessaire des échangeurs de chaleur.
- Sur le plan chimique, il est préférable qu'ils soient non toxiques, compatibles avec les matériaux de construction utilisés, et avec les lubrifiants.

Pour une meilleure efficacité dans l'échangeur de chaleur, un mélange de plusieurs types de réfrigérants peut être utilisé, c'est ce qu'on appelle le mix-réfrigérant (MR). Dans le cas du GNL, le MR peut être composé d'hydrocarbures plus lourd comme le propane (C_3H_8), éthylène (C_2H_4), ainsi que de l'azote et/ou du méthane. Suivant la zone de refroidissement à atteindre, on pourra utiliser un MR avec une composition spécifique.

Les différences entre les procédés de liquéfaction du gaz sont principalement liées au type de cycles de réfrigération employés. Ces procédés peuvent être classés en trois grands groupes : les procédés de liquéfaction en cascade, les procédés en MR et les procédés à expansion. Certains systèmes de liquéfaction peuvent être une combinaison de plusieurs types de procédés.

3 Procédé en cascade

Le procédé classique de liquéfaction en cascade tente d'approximer la courbe de refroidissement en utilisant une série de réfrigérants (généralement trois) dans des boucles séparées.

L'utilisation de plus de trois réfrigérants permet une approximation plus proche de la courbe de refroidissement, mais avec le coût supplémentaire d'équipements additionnels, une complexité de cycle accrue, des coûts d'exploitation plus élevés et une empreinte au sol plus grande.

Le procédé en cascade réduit les pertes irréversibles de transfert de chaleur en utilisant plusieurs cycles de réfrigération dont les réfrigérants s'évaporent à des températures différentes mais constantes.

Le cycle en cascade est flexible en fonctionnement, car chaque circuit de réfrigérant peut être contrôlé séparément. Ce cycle nécessite une surface d'échange thermique relativement faible par unité de capacité.

La figure suivante montre un procédé de liquéfaction en cascade. Il comporte trois étapes de réfrigération avec des réfrigérants différents pour chaque étape : l'une pour le pré-refroidissement, la seconde pour la condensation, et la troisième pour le sous-refroidissement.

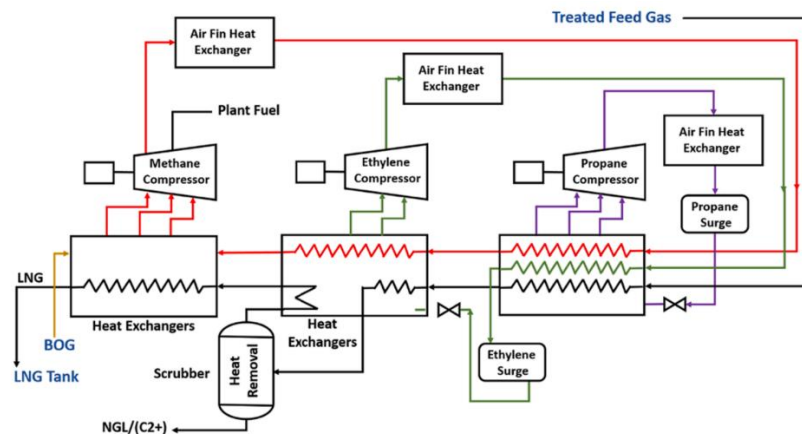


Diagramme schématique du procédé en cascade avec réfrigérant pur.

Source : (Bassioni & Klein, 2024)

Le procédé de réfrigération dans sa forme pure utilise du méthane, de l'éthylène ainsi que du propane comme fluides d'échange thermique. Le cycle au propane contribue au pré-refroidissement (zone 1) de l'alimentation en gaz naturel pour permettre la condensation de l'éthylène. Le cycle à l'éthylène condense (zone 2) ensuite l'alimentation en gaz naturel en plus du méthane dans le cycle final. Le cycle au méthane permet alors de sous-refroidir le GNL (zone 3).

Le principal inconvénient du procédé en cascade fonctionnant avec des réfrigérants fluides purs (réfrigérants à un seul composant non mélangé) est que la réfrigération est fournie à température constante à des niveaux de température discrets. En revanche, les procédés en mix-réfrigérant fournissent de la réfrigération sur une plage de températures.

L'avantage de ce procédé réside dans la faible surface nécessaire pour l'échangeur thermique, avec un risque technique faible. Toutefois, les inconvénients sont un coût élevé et une adaptation insuffisante aux variations de la composition du GN.

4 Procédés à réfrigérant mixte

Les procédés à réfrigérant mixte utilisent un mélange de réfrigérants, dans un ou plusieurs cycles de réfrigération, pour transformer le GN en GNL. Les réfrigérants utilisés sont les mêmes que dans le procédé en cascade (propane, éthylène, méthane).

Cependant, certains procédés combinent ces réfrigérants avec de l'azote, sous forme de mélange binaire, ce qui augmente le point d'ébullition du réfrigérant près du point de sous-refroidissement, améliorant ainsi l'efficacité et réduisant la pression de fonctionnement.

L'efficacité énergétique et économique de tout procédé de réfrigération mixte (MRC, Mixed Refrigerant Cycle) dépend des constituants du mélange et de leur concentration. L'efficacité énergétique des MRC est élevée lorsqu'une seconde phase liquide apparaît dans l'évaporateur.

Une immiscibilité liquide-liquide est observée à basse température dans les mélanges multi composants d'azote-hydrocarbures, de fluorocarbures-hydrocarbures, de fluorocarbures-hydro chlorofluorocarbures et de fluorocarbures-hydrofluorocarbures. Cette immiscibilité peut être exploitée pour obtenir une évaporation à température quasi constante à l'aide de mélanges binaires ou multi composants.

Il existe différents types de procédés à réfrigérant mixte, tels que le procédé en cascade à réfrigérant mixte, le procédé à réfrigérant mixte unique (Single Mixed Refrigerant en anglais SMR), et le procédé à double réfrigérant mixte (Dual Mixed Refrigerant en anglais DMR).

4.1 Procédé en cascade à réfrigérant mixte

Le procédé en cascade à réfrigérant mixte (MR) utilise des réfrigérants mélangés dans les trois zones de refroidissement. Ce procédé correspond étroitement à la courbe de refroidissement dans l'échangeur de chaleur, contrairement au procédé en cascade à réfrigérant pur, ce qui permet une meilleure efficacité énergétique.

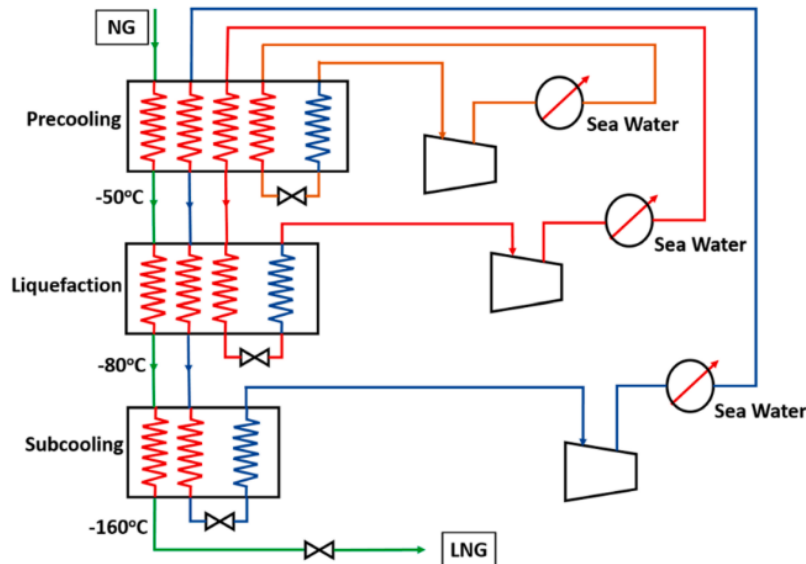


Diagramme schématisé du procédé en cascade à réfrigérant mixte.

Source : (Bassioni & Klein, 2024)

Les avantages du procédé à réfrigérant mixte en cascade sont une température de fonctionnement proche de la courbe de refroidissement du gaz naturel, ainsi que la possibilité d'ajuster la composition du réfrigérant en fonction de celle du gaz naturel.

L'inconvénient est que le procédé présente un comportement dynamique plus lent, car le MR doit être ajusté en fonction de la composition de l'alimentation en GN.

4.2 Procédé à réfrigérant mixte unique (SMR)

Le procédé SMR comprend les étapes suivantes : compresseur, refroidisseur (air ou eau), vanne d'expansion et échangeur cryogénique multi système (refroidissement et évaporation). Le gaz naturel entre dans l'échangeur de chaleur, à température ambiante et haute pression, et échange de la chaleur avec le MR utilisé.

La composition du MR dépend de la composition de l'alimentation en gaz naturel (GN), de la pression, de la température ambiante et de la pression de l'usine de liquéfaction.

Le GN sort alors sous forme de GNL sous-refroidi et est immédiatement exposé à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique par la vanne d'expansion.

D'autre part, le flux de MR est comprimé par plusieurs compresseurs, puis évaporé à l'intérieur de l'échangeur de chaleur, où la pression est réduite dans la vanne d'expansion.

La figure suivante montre un schéma du procédé SMR.

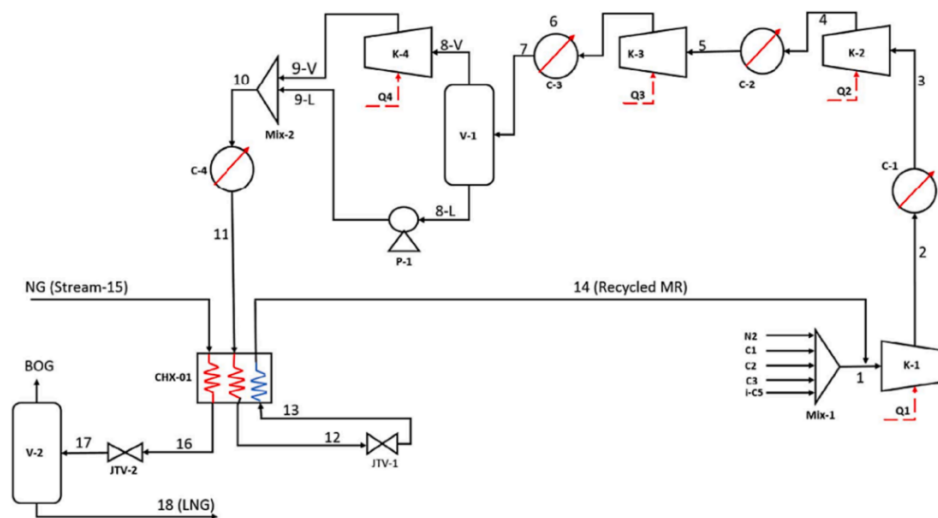


Diagramme schématique du procédé SMR.

Source : (Bassioni & Klein, 2024)

Ici, le RM est un mélange de plusieurs composés (principalement des hydrocarbures à bas point d'ébullition et de l'azote), dont la composition optimale est déterminée par la composition du gaz naturel, la pression d'alimentation, la pression de l'usine de liquéfaction et la température ambiante.

Le procédé de réfrigération suit les étapes suivantes : compression – refroidissement – condensation – détente – évaporation. Le refroidissement du réfrigérant se produit à température ambiante, tandis que son évaporation a lieu à basse température, ce qui est utilisé pour la liquéfaction.

En raison de son efficacité thermique relativement faible, le procédé SMR est principalement adapté aux unités de production de taille moyenne ou de petite taille, où le faible coût et la simplicité sont les principaux critères économiques. Le rendement est aussi beaucoup plus faible que les autres procédés.

4.3 Procédé à double réfrigérant mixte (DMR)

Dans ce procédé, la liquéfaction du GN se fait en deux étapes séparées de réfrigérant. Dans la première étape, un réfrigérant mixte plus lourd est utilisé pour pré-refroidir le GN. Dans la deuxième étape, le réfrigérant mixte est plus léger par rapport à la première, où le GN refroidi est condensé dans l'échangeur de chaleur.

La taille de l'échangeur de chaleur est moitié moins grande que dans le procédé SMR, car le cycle de refroidissement est divisé en deux. Le schéma du procédé DMR est montré à la figure suivante.

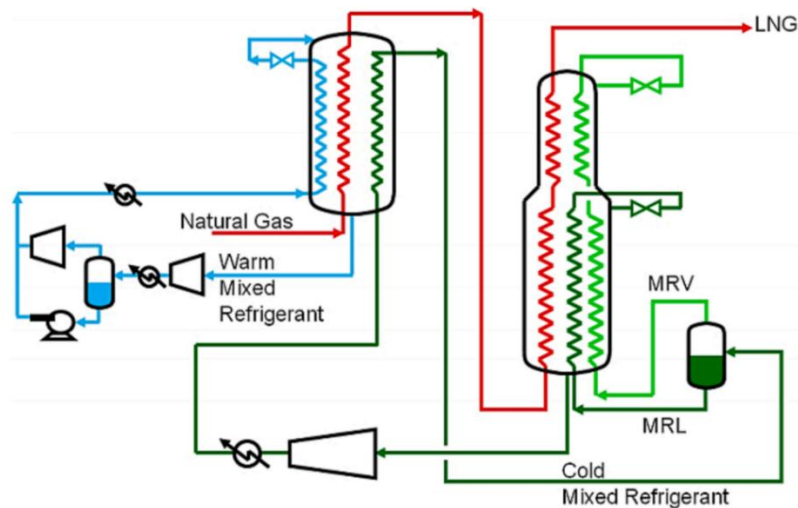


Diagramme schématique du procédé DMR.

Source : (Bassioni & Klein, 2024)

Le type de DMR le plus couramment utilisé est le procédé à réfrigérant mixte pré-refroidi au propane, connu sous le nom de C3-MRC (C3 pour propane MRC Mixed Refrigerant Cycle). L'étape de pré-refroidissement utilise du propane pur (C_3H_8) comme réfrigérant, tandis que les processus de liquéfaction et de sous-refroidissement utilisent un flux de réfrigérant mixte.

C'est le procédé le plus dominant en raison de son efficacité énergétique élevée ; cette efficacité découle de la forte correspondance entre la courbe de refroidissement du GN.

Cependant, quelques défis surviennent dans ce procédé, notamment l'utilisation du propane comme réfrigérant principal dans l'étape de pré-refroidissement, ce qui nécessite un important stock de propane, un degré de complexité plus élevé dans la conception.

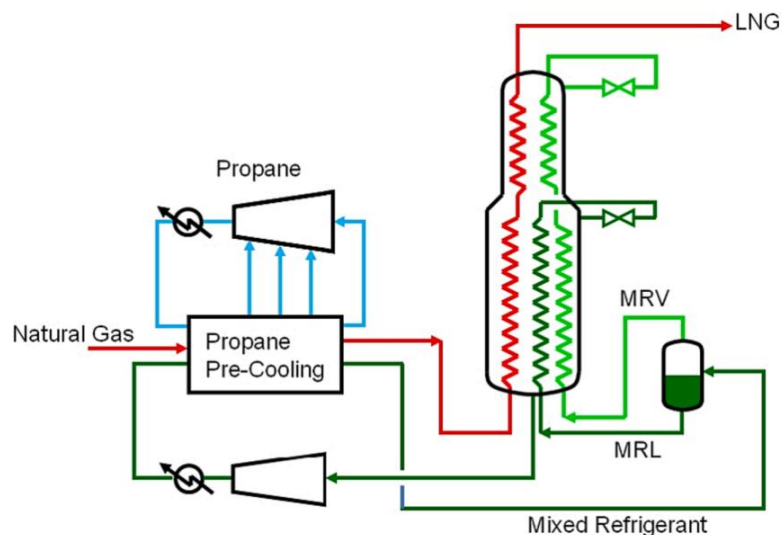


Diagramme schématique du procédé C3-MR.

Source : (Bassioni & Klein, 2024)

Le processus de pré-refroidissement permet une conception d'usine plus efficace et consomme moins d'énergie par rapport aux systèmes SMR. L'inconvénient de cette modification est une complexité accrue du procédé ainsi qu'un nombre plus élevé d'équipements de traitement.

5 Procédé à expansion N2-CH4

Ce procédé fonctionne à l'aide d'un turbo-détendeur pour générer le réfrigérant utilisé dans le processus de liquéfaction. La détente d'un gaz dans une turbo-détendeur ou turbine à expansion peut être considérée en première approximation comme un processus isentropique, c'est-à-dire un processus à entropie constante.

En sortie de turbine, le gaz possède une pression inférieure à la pression d'entrée et il subit par ailleurs un refroidissement. La température de sortie dépend de la température d'entrée, de la différence de pression ainsi que des propriétés physiques du gaz. Du fait de la chute de température, une liquéfaction partielle du gaz détendu est possible.

Les cycles de compression et de détente sont donc assurés par le turbo-détendeur, qui permet de produire du froid à partir d'un fluide. Différentes conceptions existent, comprenant un, deux ou plusieurs turbo-détendeurs.

Pour ces grands détendeurs, l'énergie mécanique générée peut être utilisée pour entraîner un générateur électrique ou un compresseur. Le réfrigérant utilisé est soit le méthane, soit l'azote, et ils sont tous deux maintenus à l'état gazeux tout au long du cycle de réfrigération.

Étant donné qu'il s'agit d'un composant unique, aucun ajustement de composition n'est requis, ce qui simplifie les conditions d'exploitation.

De plus, le procédé est moins sensible aux variations de la composition du gaz naturel, car l'échangeur de chaleur peut fonctionner sur une large plage de températures. L'avantage de ce procédé réside donc dans sa stabilité opérationnelle.

Cependant, son efficacité est inférieure à celle des procédés en cascade ou à réfrigérant mixte. Le procédé à base de détendeur d'azote (N_2) est considéré comme une approche prometteuse pour les applications en mer.

La figure suivante montre un schéma d'un système à procédé à expansion N2-CH4.

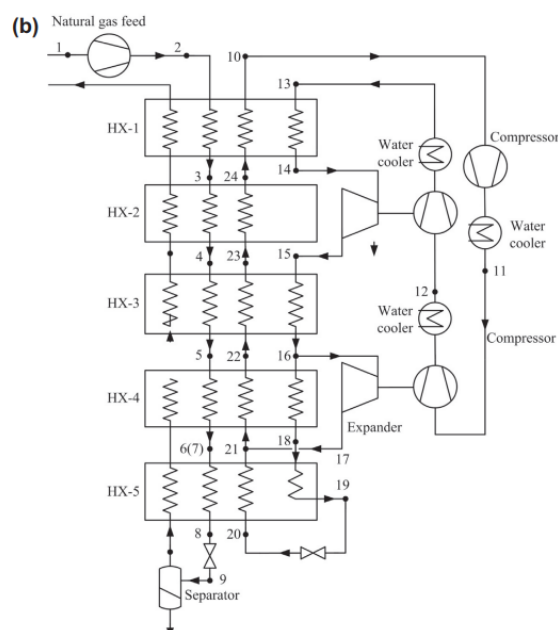


Diagramme schématique d'un procédé d'expansion N2-CH4

Source : (Mokhatab et al., 2014)

En tant que processus de liquéfaction typique, le cycle de liquéfaction par expansion d'azote est une bonne option pour les applications de liquéfaction à petite échelle. Les avantages et bénéfices typiques de ce processus sont sa simplicité, son adaptabilité aux contenus variés de matière première en modifiant la composition du mélange réfrigérant N_2-CH_4 et l'élimination de certaines exigences en matière de réservoir de réfrigérant et de séparateurs de phases, car les réfrigérants azote et méthane sont toujours à l'état gazeux.

Le premier turbo-détendeur est utilisé pour produire de l'énergie froide dans une plage de températures élevée. On peut remplacer la phase de pré-refroidissement par expansion, par une unité de pré-refroidissement au propane comme vu précédemment.

En adoptant une unité de pré-refroidissement au propane, qui est plus efficace dans la plage de températures élevées, il est possible de réduire la consommation d'énergie du cycle de liquéfaction global. Mais cela nécessite une unité de réfrigération supplémentaire.

Sans unité de propane, aucune réfrigération mécanique supplémentaire n'est utilisée, ce qui simplifie le processus en conséquence.

Mais la pénalité associée est de comprimer le mélange réfrigérant N_2-CH_4 à une pression plus élevée pour produire plus d'énergie froide, ce qui peut à son tour augmenter la consommation totale d'énergie.

Le mélange N_2-CH_4 est utilisé comme réfrigérant de travail pour fournir l'énergie frigorifique externe pour la liquéfaction du gaz naturel. Le méthane et l'azote sont respectivement les composants à points d'ébullition élevé et faible.

La fraction molaire de méthane dans le mélange réfrigérant a deux effets sur la consommation d'énergie du cycle de liquéfaction. D'une part, La consommation de travail du compresseur par débit unitaire du mélange réfrigérant augmente avec la fraction molaire de méthane.

D'autre part, le méthane a une capacité thermique spécifique plus élevée que l'azote, donc l'énergie frigorifique fournie par l'expandeur est plus grande par débit unitaire du mélange avec une concentration plus élevée de méthane, ce qui réduira à son tour le débit du mélange réfrigérant et pourrait diminuer la consommation de puissance du compresseur.

6 Comparatif énergétique des différents procédés

Dans cette section, les analyses énergétiques et exergétiques des différents procédés de liquéfaction du gaz naturel sont discutées. Pour tous les procédés de liquéfaction du gaz naturel, les pertes combinées pour le système de compression, y compris les refroidisseurs, sont les contributeurs les plus importants à la perte de travail.

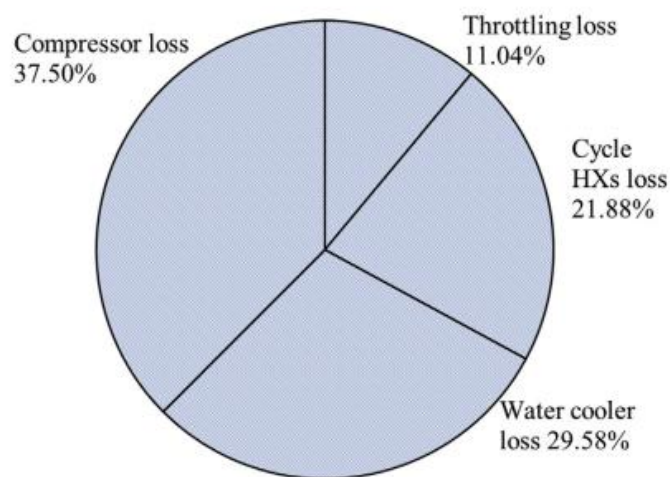
6.1 Procédé en cascade classique

Les économies d'échelle montrent que le procédé en cascade est le plus adapté aux grandes capacités, car la faible surface d'échange thermique et la faible consommation d'énergie compensent le coût des multiples machines. Parmi les autres avantages, on notera les faibles risques techniques et l'utilisation d'équipements standard, ce qui permet de réduire la durée de construction.

Cependant, les inconvénients de la technologie en cascade sont les coûts relativement élevés, la flexibilité insuffisante/l'adaptation aux variations de la composition du gaz naturel et les limitations de capacité des unités de production.

En termes énergétiques, la figure suivante montre la distribution des pertes d'énergie dans un procédé en cascade. La perte d'énergie maximale se produit dans les unités de compression à environ 37,5 %, ce qui est inférieur à celle du cycle à réfrigérant mélangé (environ 52 %).

Cela est principalement dû au fait que dans le procédé en cascade, chaque flux de réfrigérants mélangés fonctionnant à différents niveaux de température est comprimé à différentes pressions de fonctionnement.



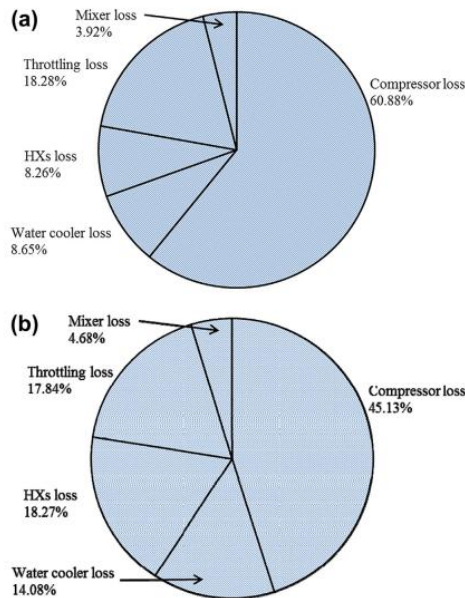
Distribution d'exergie perdue dans un procédé de réfrigération en cascade.

Source : (Mokhatab et al., 2014)

Le procédé en cascade présente également une perte d'énergie relativement faible dans les échangeurs de chaleur par rapport au cycle de l'expandeur N₂-CH₄. Comme discuté précédemment, cela est principalement dû à la faible et uniforme approche de température entre les flux chauds et froids dans les échangeurs de chaleur du procédé.

6.2 Procédé à réfrigérant mixte

Les figures suivantes montrent la perte relative d'exergie dans le procédé à réfrigérant mixte (MRC) et dans le procédé C3-MRC (pré-refroidissement au propane) respectivement. Il est observé que, pour les deux procédés, la perte maximale d'exergie se produit dans le compresseur : 60,88 % pour le MRC et 45,14 % pour le procédé de pré-refroidissement au C3.



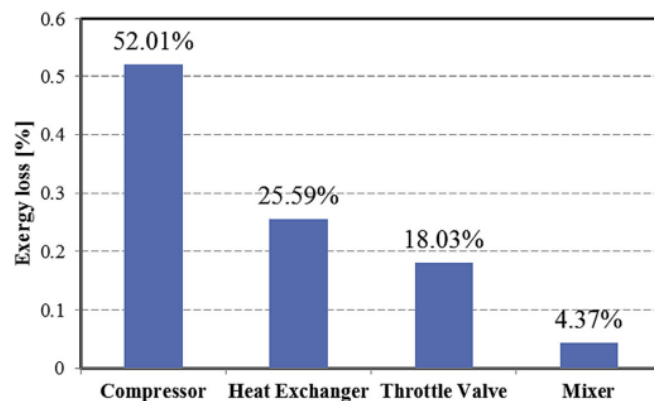
a) Distribution d'exergie perdue dans un procédé de réfrigérant mixte.

b) Distribution d'exergie perdue dans l'unité de pré-refroidissement au propane.

Source : (Mokhatab et al., 2014)

Dans les processus de détente de l'azote basée sur une turbine du MRC, la deuxième plus grande perte d'exergie se produit dans les vannes de détente en raison de la quantité significative d'irréversibilité dans le processus d'expansion isenthalpique.

De même, dans le procédé de pré-refroidissement au C3-MRC, la perte d'exergie dans la vanne de détente est également significative, bien que la deuxième plus grande perte se produise dans les échangeurs de chaleur à flux multiples. Pour les deux unités, la perte d'exergie dans les mélangeurs de flux est la plus faible.



Distribution d'exergie perdue pour un système C3-MRC.

Source : (Mokhatab et al., 2014)

En comparant la perte d'exergie du point de vue des différents types d'équipements de procédés dans l'ensemble du cycle de liquéfaction du gaz naturel, la figure ci-dessus montre que l'irréversibilité dans les compresseurs représente jusqu'à 52 % de la perte ; la perte d'exergie dans les équipements d'échange thermique est environ la moitié de celle des compresseurs, soit 25 % ; la perte par détente dans les vannes de détente est d'environ 18 % ; et la perte dans tous les mélangeurs de flux n'est que d'environ 4 %.

6.3 Procédé d'expansion N2-CH4

La figure suivante montre la perte d'exergie relative pour un procédé de liquéfaction par expansion N2-CH4 avec et sans unité de pré-refroidissement au propane.

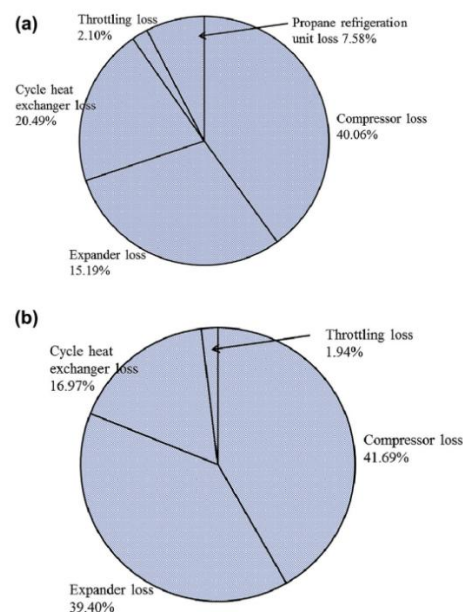
Il peut être observé que pour les deux procédés, l'unité de compresseur présente la perte d'exergie maximale, allant jusqu'à environ 42 %.

Ensuite, les pertes d'exergie se trouvent dans les turbo-détendeurs, les échangeurs de chaleur du cycle et les vannes de détente. Dans le premier procédé, environ 7,6 % de la perte d'exergie se produit dans l'unité de réfrigération supplémentaire au propane.

Ainsi, elle présente une perte d'exergie d'environ 29,8 % dans les turbo-détendeurs à une seule étape, soit environ 10 % de moins que dans les deux turbo-détendeurs du deuxième procédé.

Le procédé à un seul turbo-détendeur avec une unité de pré-refroidissement au propane permet d'économiser environ 5,5 % de consommation d'énergie par rapport à l'autre.

Cela est principalement dû au fait que les différences de température de transfert thermique relativement grandes et la charge d'échange thermique entraînent une quantité significative d'irréversibilité dans le processus d'échange thermique du cycle à double turbo-détendeur. Ainsi, les efficacités d'exergie pour les deux procédés sont respectivement d'environ 32,9 % et 31,0 %.



Distribution d'exergie perdue dans un procédé d'expansion N2-CH4.

(a) Avec unité au propane (b) Sans unité au propane.

Source : (Mokhatab et al., 2014)

Cela montre que l'unité de pré-refroidissement au propane est une méthode de réfrigération plus efficace dans la plage de températures élevées que turbo-détendeur N2-CH4 à haute température correspondant, réduisant ainsi la consommation d'énergie du cycle de liquéfaction global.

Cependant, le procédé à double turbo-détendeur élimine l'unité de réfrigération mécanique conventionnelle. Il est plus simple et plus compact, nécessitant ainsi moins d'espace d'installation, offrant une plus grande sécurité et étant plus facile à exploiter.

Le procédé à double turbo-détendeur peut avoir plus d'avantages que le procédé à un turbo-détendeur avec pré-refroidissement au propane dans certaines applications nécessitant une grande compacité et mobilité, telles que les applications offshore.

6.4 Comparaison des différents procédés pour un usage offshore

	Cascade	SMR	C3-MR	DMR	N2 Expander
Thermal Efficiency	High	Medium	High	High	Low
Equipment Count	High	Low	Medium	Medium	Medium
Hydrocarbon Refrigerant Storage	Large	Medium	Large	Medium	None
Capital Investment	Medium	Low	Medium	Medium	High
Offshore Suitability	Medium	High	Medium	High	High
Compactness	Low	Medium	Low	Medium	High
Motion Impacts	Medium	Medium	High	Medium	Low

(Chiu and Quillen, 2008)

Evaluation des procédés de liquéfaction pour un usage offshore.

Source : (Mokhatab et al., 2014)

La figure ci-dessus résume les différents avantages et inconvénients des procédés de liquéfaction décrit dans cette section.

Process	Advantages	Limitations	SEC (kWh/kg _{LNG})
Cascade (Lim et al., Mar. 2013)	- High capacity - Efficient operation	- High capital costs - Complex configuration	0.33–0.39 (Furda et al., 2022)
SMR (Khan et al., 2017)	- Simple design - Reduced capital cost - Small footprint	- Lower efficiency - Limited scalability - Flammable refrigerants	0.30–0.40 (Zhang et al., 2020)
C3MR (Khan et al., 2017); (Park et al., 2022)	- Dominance in LNG production (81 %) - High efficiency	- Less attractive for offshore applications - Large propane inventory	0.29–0.30 (Zhang et al., 2020)
DMR (Khan et al., 2017); (Lim et al., 2013)	- Removing limitations on the C3 compressors - Increased capacity	Complex configuration	0.28–0.30 (Zhang et al., 2020)
Single N ₂ Expander (Khan et al., 2017)	- Simplicity - High isentropic efficiency	High compression energy requirements	0.40–0.97 (Zhang et al., 2020)
Double N ₂ Expander (Lim et al., 2013)	Flexibility with refrigerants	- Increased HXs' size - Safety considerations	0.39–0.56 (Furda et al., 2022)

Comparaison SEC des procédés de liquéfaction du GNL.

Source : (Shady et al., 2024)

Une autre figure résume les avantages et les limitations des différents procédés mais qui compare aussi la meilleure consommation d'énergie spécifique en kWh/kg de GNL (*Specific Energy Consumption* en anglais SEC). Le SEC correspond à la quantité d'énergie électrique (ou

mécanique) consommée (en kWh) pour produire 1 kg de GNL à partir de gaz naturel. Plus le SEC est faible, plus le procédé est efficace énergétiquement.

En général, la SEC est calculée en divisant la quantité d'énergie utilisée par la quantité de produits. La SEC est recommandée dans les normes internationales, telles que l'ISO, comme indicateur de performance énergétique, car elle permet de mesurer la performance énergétique et donc d'effectuer des comparaisons de performance (benchmarking).

On remarque donc que le procédé le plus efficace en se basant sur la SEC est le DMR et le C3-MRC.

A l'heure actuelle, le meilleur procédé ayant un bon compromis reste le double réfrigérant mixte (DMR), qui assure une certaine flexibilité par la compacité et une tolérance plus élevée aux mouvements, et un coût plus abordable en comptant le coût de l'investissement et de l'équipement. L'efficacité thermique est aussi bien meilleure, bien que la capacité de réfrigération reste moins importante qu'un procédé en cascade classique.

Références

- Bassioni, G., & Klein, H. (2024). Liquefaction of natural gas and simulated process optimization – A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102431. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102431>
- Mokhatab, S., Mak, J., Valappil, J. V., & Wood, D. A. (2014). *Handbook of liquefied natural gas* (1st. edition). Elsevier, GPP.
- Shady, R., Ahmed, S. F., & Sleiti, A. K. (2024). Operation optimization of propane pre-cooled mixed refrigerant LNG Process : A novel integration of knowledge-based and constrained Bayesian optimization approaches. *Chemical Engineering Science*, 300, 120560. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120560>