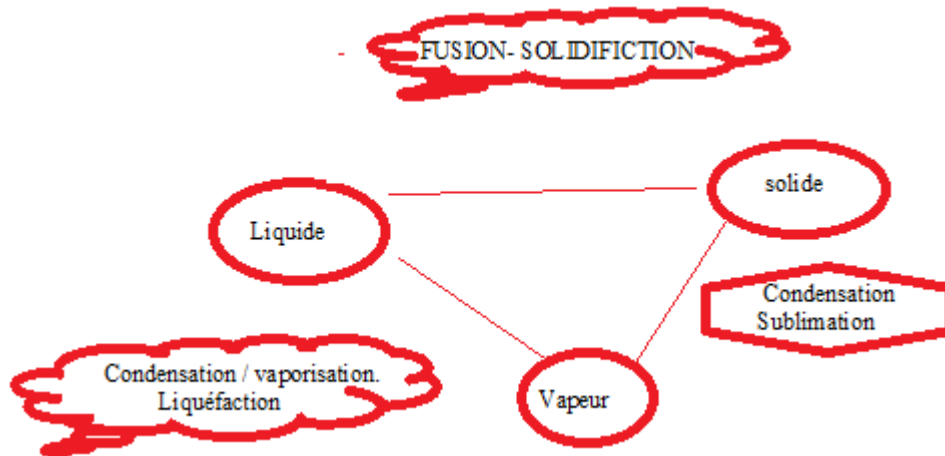


Système cryogénique

INTRODUCTION GENERALE

Le traitement de la matière subit à des transformations en fonction la variation de la température par diminution ou de la pression pour signifier le **Comportement d'un fluide cryogénique**.



Donc en parle dans la transformation des gazs de la détente et de la compression par l'intermédiaire d'une machine ou un fluide froid.

La détente est une transformation thermodynamique au cours de laquelle le système contenant un fluide, passe d'un état initial caractérisé par une pression initiale à un état final caractérisé par une pression finale inférieure à la pression initiale.

*Les détente d'un fluide permettent de connaitre ses propriétés.

*Deux détente historiques ont joué un rôle important dans la détermination des propriétés des fluides et dans les machines produisant du froid : détente de joule-Gay Lussac et la détente de Joule-Kelvin appelé aussi détente de Joule-Thomson.

I. Introduction et définition

On parle de cryogénie pour désigner les procédés de réfrigération à très basse température (typiquement inférieure à 125 K), et les distinguer des cycles de réfrigération ordinaires. Bon nombre de ces procédés

concernent la liquéfaction des gaz dits permanents, comme l'air, le gaz naturel, l'hydrogène ou l'hélium.

La cryogénie est donc le domaine de l'ingénierie qui s'intéresse aux systèmes fonctionnant à très basse température, ce qui pose des problèmes particuliers, notamment en termes de fluides et de matériaux.

Pour un système cryogénique on a la conservation de froid ou bien production de froid.

-Pour la conservation de froid on assure un isolement de gaz par le vide

Et pour la production de froid on fait diminuer la température d'un gaz ainsi extraire la chaleur liquéfier.

Nous désignons généralement les liquides cryogéniques par leur symbole chimique précédé de la lettre « L ». Exemples : LN2 ; LO2 ; LH2 ; Lar.

Les cycles de réfrigération et de liquéfaction cryogéniques mettent en jeu des combinaisons de compressions, de refroidissements, de régénérations thermiques et de détente isenthalpique ou adiabatiques des fluides.

On peut distinguer quatre grandes familles de procédés thermodynamiques cryogéniques :

- les procédés à détente isenthalpique de Joule-Thomson
- les cycles inverses de Brayton à détente isentropique
- les procédés mixtes associant une détente isenthalpique et une détente isentropique (cycle de Claude)
- les cascades classiques ou intégrées

Les liquides cryogéniques :

Les principaux liquides utilisés dans le labo: N₂ liquide dans la gamme [64-104 K]; H₂ liquide [14-30K] ; He liquide [1-5K]. Cependant, dans les applications particulières dans le labo et dans l'industrie le CH₄, Ar, O₂, l'air, le F, Kr, le Xe..., le deutérium et l'hélium sont des fluides dont l'usage se révèle intéressant du point de vue économique et pratique.

Procédés de séparation des gaz

La méthode la plus efficace de séparation des gaz permanents et des mélanges gazeux ou liquides et des mélanges liquide-gaz est la méthode cryogénique c'est-à-dire séparer le mélange à très basse température. La méthode employée pour séparer le mélange est celle de. **La rectification**, on prend par exemple l'air qui est composé de l'azote de l'oxygène, du CO₂ et de l'argon, il est nécessaire de connaître les températures d'ébullition des éléments à séparer.

PROCEDES A DETENTE ISENTHALPIQUE DE JOULE-THOMSON

Nous illustrerons ce procédé par des exemples destinés à liquéfier du gaz naturel et former du Gaz Naturel Liquéfié (GNL), considéré ici comme du méthane pur.

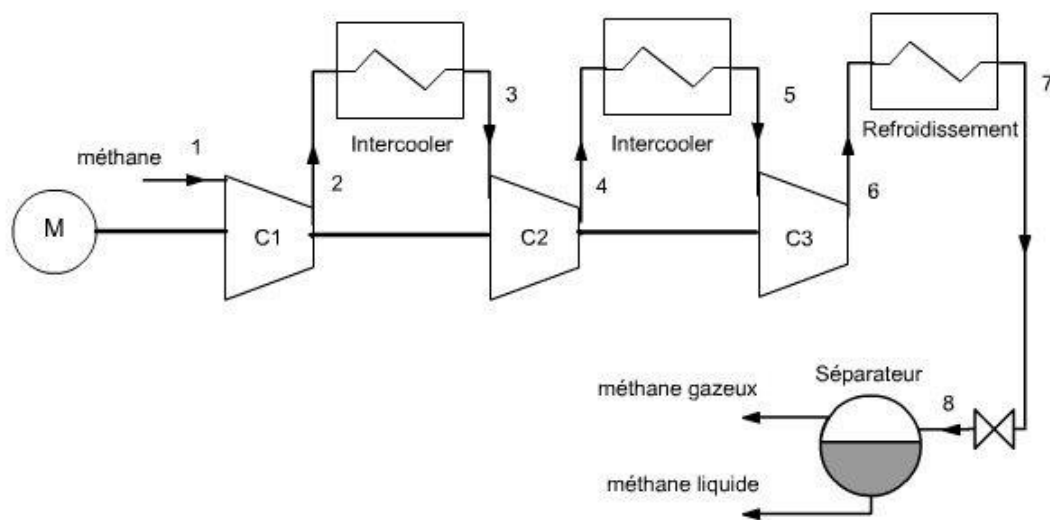
Cycle de base de liquéfaction du méthane

Pour liquéfier du gaz naturel, on comprime à 100 bars du méthane pris à 1 bar et 280 K, puis on le refroidit jusqu'à 210K (on suppose dans cet exemple que l'on dispose d'un cycle de réfrigération permettant de le faire).

La compression est supposée isentropique, mais le rapport de compression très élevé nécessite le recours à plusieurs compresseurs (3

dans cet exemple) avec refroidissement intermédiaire à 280 K. Les pressions intermédiaires sont égales à 5 et 25 bars.

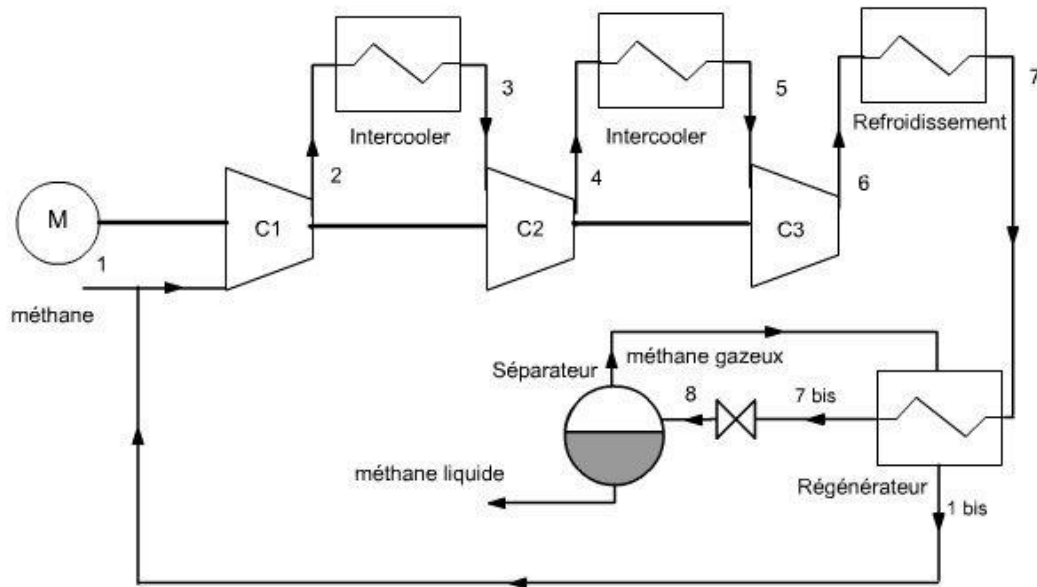
Le gaz refroidi à 210 K est détendu isenthalpiquement de 100 bars à 1 bar, et ses phases liquide et gazeuse séparées. Comme le montre le schéma de l'installation de la figure ci-dessous, le méthane entre dans la partie supérieure gauche, et les fractions liquide et gazeuse sortent en



Cycle de Linde

Dans un cycle de Linde (voir ci-dessous), on améliore le cycle précédent sur deux points :

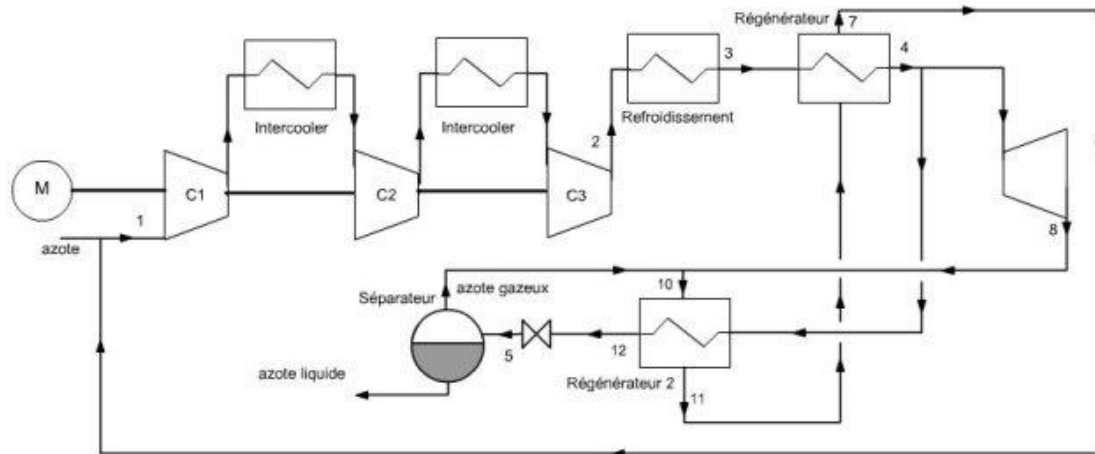
- on recycle le méthane gazeux après détente isenthalpique
- on introduit un échangeur de chaleur entre ce méthane gazeux et le méthane sortant du refroidisseur, afin de refroidir le gaz comprimé non plus à 210 K mais à 191 K.



PROCEDES MIXTES : CYCLE DE CLAUDE

Le cycle de Linde utilise une détente isenthalpique qui présente deux inconvénients : d'une part le travail de détente est perdu, et d'autre part le refroidissement ne peut être obtenu que si l'état thermodynamique du fluide est tel que la détente de Joule-Thomson conduit à un abaissement de la température.

Claude a quant à lui proposé un cycle qui met en jeu une turbine et un détendeur et présente la particularité que l'installation fonctionne avec un seul fluide comprimé à un seul niveau de pression, comme le montre la figure ci-dessous. Le cycle de Claude a été utilisé dans de nombreuses installations de liquéfaction de l'air.



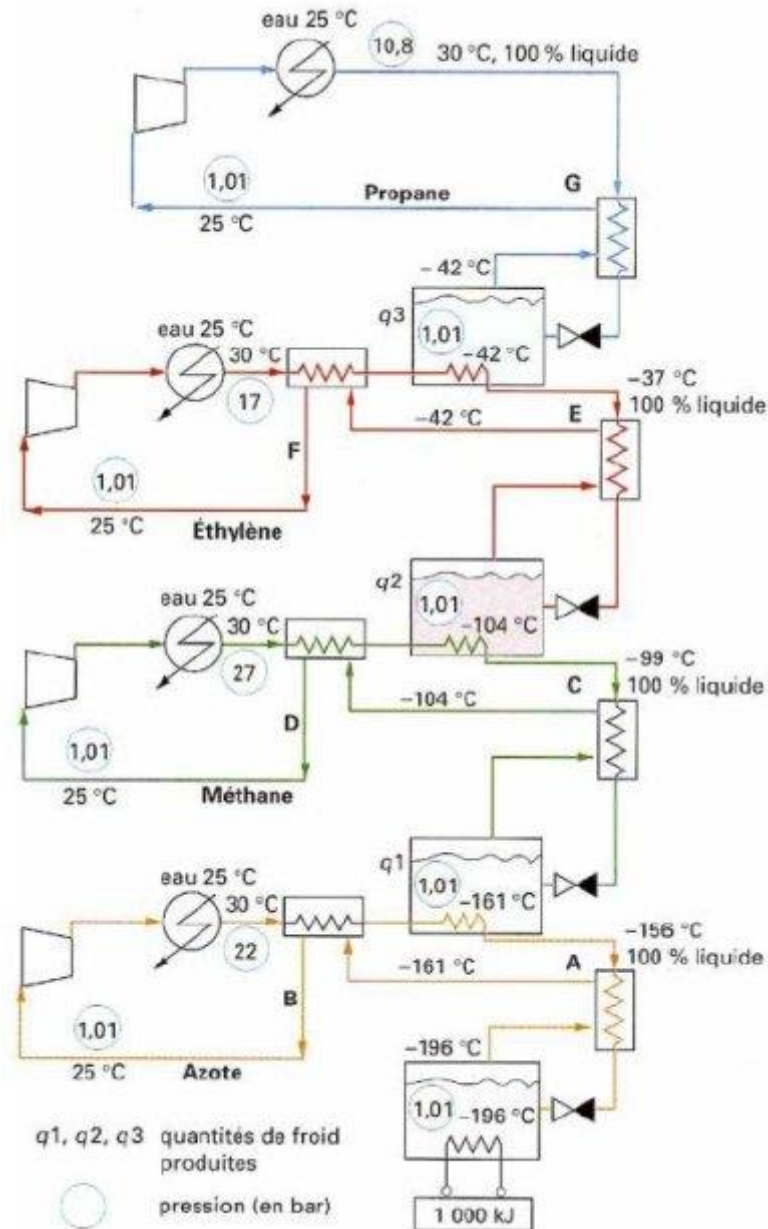
l'intérêt de ce cycle est que le rapport de compression peut être notablement plus faible que dans le cas du cycle de Linde. L'une des difficultés est que la machine de détente ne peut fonctionner avec un bon rendement que si le fluide reste dans la zone vapeur ou conserve un titre élevé. L'originalité du cycle de Claude est donc de combiner détente isentropique dans la turbine, et détente isenthalpique dans la seule détente conduisant à la liquéfaction du gaz.

Le début du cycle est le même que celui de Linde : compression du gaz à liquéfier, puis refroidissement à la température ambiante environ (1-3). Le gaz passe ensuite dans un régénérateur qui permet de le refroidir à environ -105°C (3-4). Le flux est alors divisé, environ 15 % étant détendu dans une turbine (4-8). Le flux principal passe alors dans un deuxième régénérateur dont il sort à très basse température (4-12). Il subit alors une détente isenthalpique (12-5) et la phase liquide est extraite. La phase vapeur est alors mélangée au flux sortant de la turbine, et sert de fluide de refroidissement au deuxième régénérateur (10-11), puis au premier (11-7) avant d'être recyclé par mélange avec le gaz entrant dans le cycle.

CYCLES EN CASCADE

Il est aussi possible d'utiliser des cycles de réfrigération en cascade, l'évaporateur de l'un d'eux servant de condenseur à l'autre et ainsi de suite (figure ci-dessous). Les différents circuits frigorifiques sont alors indépendants sur le plan hydraulique, mais couplés thermiquement par leurs évapo-condenseurs.

Une variante, très utilisée de nos jours dans les unités de liquéfaction du gaz naturel, consiste à utiliser une cascade dite incorporée, faisant appel à un fluide thermodynamique unique composé d'un mélange de méthane, d'éthane, de propane, de butane et de pentane.



Généralités sur le vide

Le vide est dérivé du latin «vacuo», ce terme signifie littéralement espace vidé d'air, une approche plus précise pour les applications techniques actuelles pourrait être représentée par un volume rempli de gaz dans lequel la densité (le nombre de particules par unité de volume) serait plus basse que la densité de notre milieu atmosphérique normal. D'après les normes DIN Deutsches Institut Fur Norming, le vide désigne

l'état d'un gaz raréfié caractérisé par une pression ou une masse volumique inférieure à celle de l'atmosphère ambiante. En effet, le vide absolu n'existe pas. Dans notre environnement, on en utilise le vide de manière quotidienne, du paquet de café emballé sous vide au tube cathodique ; de 0.1 atm à 10^{-9} ce qui représente l'ordre de 77 milliards de molécules/ cm³. Le meilleur vide obtenu jusqu'à présent est l'ultra vide qui est de 10^{-17} atm ou 270 molécules/ cm³.

Unité d'utilisation du vide :

Le vide qui correspond à une diminution de la quantité de gaz dans un volume donné qui est impossible de mesurer directement qu'on réalité, en mesure par la pression c'est-à-dire la force exercée par les molécules sur les parois de récipient. La pression est une force par une unité de surface qui est exprimée par le système légal en Pascal (Pa) et qui correspond à 1 Newton/ m². On peut utiliser d'autres unités telles que le Torr, le bar, le mmHg, l'Atm... En terme de conversion : $1 \text{ atm} = 1.013 \text{ bar} = 760 \text{ mmHg}$
 $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg}$ $1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ Bar}$

Technique du vide

La technique vide a connu durant ces dernières années un grand développement, en raison de ses applications multiples, elle est devenue une véritable discipline industrielle. Le projet d'une installation à vide dépend de deux paramètres pratiques fondamentaux qui sont la pression du travail qui se confond souvent avec la pression limite et du temps

nécessaire pour l'obtenir. Ses deux paramètres dépendent des pompes et de l'enceinte à vide. On peut subdiviser le vide en plusieurs niveaux de pression selon les pressions recherchées en pratique :

- 1- Le vide grossier, de 10^5 à 10^2 pa
- 2- Le vide moyen (vide primaire) de 10^2 à 10^{-1} pa
- 3- Le vide poussé (vide secondaire) 10^{-1} à 10^{-5} pa
- 4- Ultra vide qui est inférieur à 10^{-5} pa

Une pompe peut fonctionner dès la pression atmosphérique ce qu'on appelle primaire et secondaire quand elle nécessite un vide moyen pour s'amorcer. Lorsque le gaz est aspiré, comprimé puis refoulé, la pompe est dite d'extraction ou de transfert : par compression et réduction du volume ou par compression et entraînement moléculaire. Certaines pompes utilisent la sorption ou la condensation, ce sont des pompes de fixation.

Une pompe est caractérisée par sa pression d'amorçage, son vide limité, son débit volumique et son taux de compression dans les cas des pompes d'extraction.

1.4. Différentes type de pompes

- 1- Pompes volumétriques (pompes à palette)
- 2- Pompes à entraînement
 - a) Pompes à diffusion d'huile
 - b) Pompes turbo moléculaires
- 3- Pompes à fixation
 - a) Pompes à sorption

b) Pompes à sublimation de titane

c) Pompes ionique et la Pompes cryogénique.

Mesure du vide

On peut distinguer deux types de manomètres :

1- Les manomètres mécaniques (destiné à la mesure du vide primaire)

2- Les jauges électriques, destiné au vide secondaire et à l'ultravide

Procédés de séparation des gaz

La méthode la plus efficace de séparation des gaz permanents et des mélanges gazeux ou liquides et des mélanges liquide-gaz est la méthode cryogénique c'est-à-dire séparer le mélange à très basse température. La méthode employée pour séparer le mélange est celle de

He4	H2	Ne	N2	O2	Ar	CH4
4.2	20.4	27.1	77.1	90.2	87.3	111.

7

L'importance du diagramme TS

Le diagramme TS est la base de séparation d'un mélange gazeux ou liquide-vapeur ou liquide, il nous permet de comprendre la nature de notre mélange.

- Un gaz sec qui se trouve loin de la courbe de saturation et dépourvu de son liquide.

- Un liquide sec est dépourvu de sa vapeur. Ce type de fluide se trouve aussi loin de la courbe de saturation.

- La vapeur saturante ou liquide saturé se trouve dans la courbe de saturation.

Note :

- L'entropie faible signifie que le mélange est sous forme liquide.
- L'entropie du gaz est plus importante à celui du liquide car le mouvement des molécules de gaz est plus important que celui du liquide

Paramètres de système performant

Il existe trois moyen pour indiqué les performances d'un système de liquéfaction soit par :

- Le travail requis par unité de masse du gaz compressé ($-W$)
- Le travail requis par unité de masse de gaz liquéfié ($-W m f$)
- La fraction totale du flux de gaz liquéfié

Les deux dernières fonctions sont reliées à la première par la relation : ($-W$)= ($-W m f$) $y \rightarrow (1)$ Dans tous les systèmes de liquéfaction, on doit minimiser le travail requis et augmenté au maximum la fonction du gaz liquéfié. Ses moyens de fonctionnement diff rent d'un gaz à un autre, pour cela on doit tenir compte d'un autre paramètre qui permettra la comparaison du même système utilisé pour diff rent fluides : qui est la Figure of merite FOM Qui est définie comme le travail théorique minimal requis pour le système : $FOM = W W = -W i / m f - W / m f$.

Sachant que le travail de la FOM varie entre 1 et 0 elle donne la mesure au quel le système réel approche les performances du système idéal. Il existe plusieurs paramètres de performance qui s'appliquent aux composants du système réel, cela inclut :

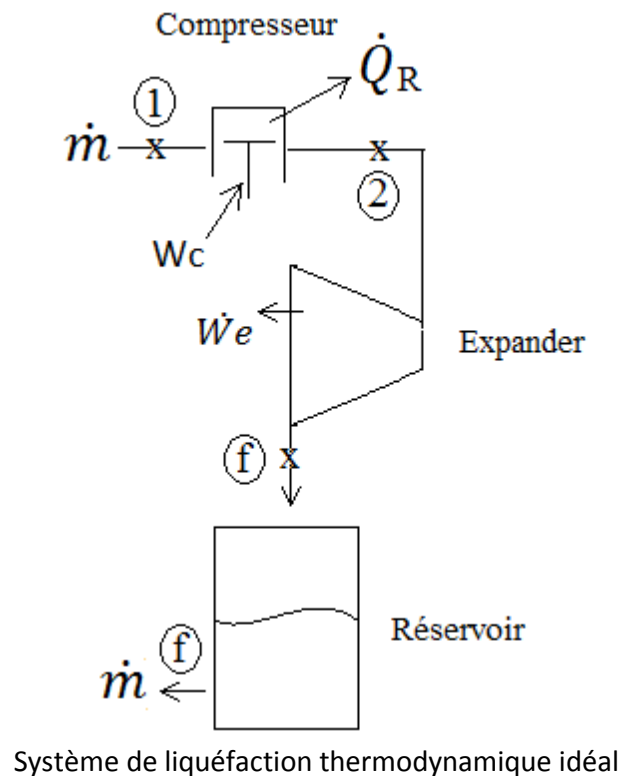
- L'efficacité des compresseurs et des expanders adiabatique
- Efficacité mécanique des compresseurs et des expanders
- L'efficacité des échangeurs de chaleur
- Les chutes de pression dans les canalisations, les échangeurs de chaleur, etc
- Transfert de chaleur de l'environnement ambiant vers le système

Tout au départ nous devant pas parler initialement sur les performance du système et nous devant pas prendre compte de ses facteurs , nous nous les retrouveront après avoir premièrement assuré que tout les système est efficace à 100% et que les chutes de pression sont irréversibles et les pertes de chaleur sont nulles.

Le système thermodynamique idéal :

Le système idéal est un procédé de performance qui représente un système réversible, l'énergie employer pour séparer un mélange est la même pour les réunir une autre fois. Afin d'avoir un moyen de comparaison des systèmes de liquéfaction par rapport à la FOM, on doit premièrement analyser le système idéal thermodynamique. On dit qu'un système est idéal thermodynamiquement, mais pratiquement il n'est pas idéal, Le cycle le plus parfait en thermodynamique est le cycle de carnot. La liquéfaction est un processus d'un système ouvert donc pour le système idéal de liquéfaction nous allons choisir les premier processus du cycle de carnot. La liquéfaction est un processus d'un système ouvert donc pour le système idéal de liquéfaction nous allons choisir les premiers processus du cycle de carnot, une compression

isotherme réversible suivie d'une détente isentropique réversible, le cycle idéal est indiqué sur le diagramme TS avec le schéma du système



Le gaz à liquéfier est comprimé réversiblement et isothermiquement de l'état ambiant point 1 à une certaine pression point 2 cette pression est choisie de sorte que le gaz devienne liquide saturé sur une détente isentropique réversible par l'expander au point f l'état final au point f est pris à la même pression que la pression initiale au point 1 la pression attendue à la fin de la compression isotherme est extrêmement haute de l'ordre de 70 à 80 GPa pour l' N_2 ce qui est impossible pratiquement d'atteindre ses pressions dans un système de liquéfaction, ce qui est la raison à laquelle il ne peut pas être un système idéal pratiquement. Dans l'analyse des systèmes de liquéfaction nous appliquons la première loi de la thermodynamique pour le flux stationnaire, écrite en générale comme :

$$\dot{Q}_{net} - \dot{W}_{net} = \dot{m} h_{sortie} - \dot{m} h_{entrée} \rightarrow (3)$$

$$Q_{R-W} = m(h_f - h_1) = -m(h_1 - h_f) \rightarrow (4)$$

Etant le processus de transfert de chaleur réversible et isothermique dans le cycle de Carnot on appliquant la seconde loi de la thermodynamique

$$Q_R = m(T_1 S_2 - S_1) = m(T_1 S_1 - S_f) \rightarrow (5)$$

Car le processus du point 2 au point f est isentropique $S_2 = S_1$ ou s est l'entropie du fluide en combinaison de l'éq (5) dans (4) on peut déterminer le travail requis pour le système idéal :

$$W_{im} = T_1(S_1 - S_f) - (h_1 - h_f) = W_{imf} \rightarrow (6)$$

Dans le système idéal 100% du gaz est comprimé et liquéfié ou $m = m_f$, ce qui implique que $Y=1$.

Système de séparation de l'air :

Il existe plusieurs systèmes de séparation de l'air qui passe par plusieurs étapes :

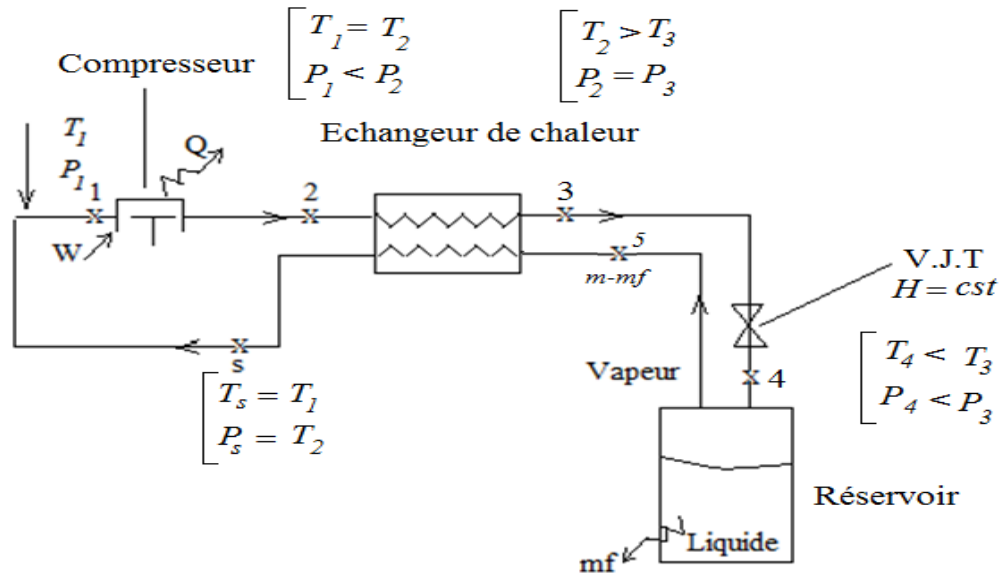
- La compression à l'aide d'un compresseur
- Refroidissement en utilisant des échangeurs de chaleur
- La séparation des mélanges en passant à la fin à travers la colonne de séparation.

Le système le plus simple connu est le système de LIND Hampson simple dont sa simplicité réside dans le nombre de compresseur, d'échangeur, résistance de la J.T, et les turbines à gaz utilisées.

Système de LIND Hampson à colonne simple

Le système de LIND Hampson à colonne simple est utilisé pour la liquéfaction des gaz spécialement l'air. Il est composé d'un compresseur, d'un échangeur de chaleur, d'une vanne de JT et d'une seule colonne.

Figure



procédé de LIND Hampson à colonne simple.

Le gaz introduit au point 1 dans les conditions ambiante T_1 , P_1 passe par un compresseur dans cette première étape ca nécessite une utilisation importante d'énergie suivi par un dégagement de chaleur à la sortie d'un compresseur au point 2 : $P_2 > P_1$, le gaz passe ensuite à travers un échangeur de chaleur ou il subira une détente isobare dont ses condition à la sortie au point 3 : $T_3 < T_2$. En suite il traversera la vanne de J.T ou il va subir une détente isenthalpique $H = \text{Cst}$ ou le gaz sera liquéfié partiellement et on aura à la sortie (point 4) un mélange (L+G) après la décantation au niveau du bac de stockage le liquide sera récupéré en bas du bac et la vapeur froide sera retourné dans le procédés de nouveau, il repassera par l'échangeur de chaleur ou il subira une détente isobare ou sa température revient à son état initial, et le gaz sera recyclé introduit avec le gaz du départ.

On appliquant la première loi de la thermodynamique en supposant que le travail se fait dans des conditions idéales :

- Pas de chute de pression
- Pas de perte de chaleur
- Echangeur de chaleur efficace à 100%

Système de Linde à colonne de rectification: La colonne simple de

Linde présente 2 sérieux inconvénients :

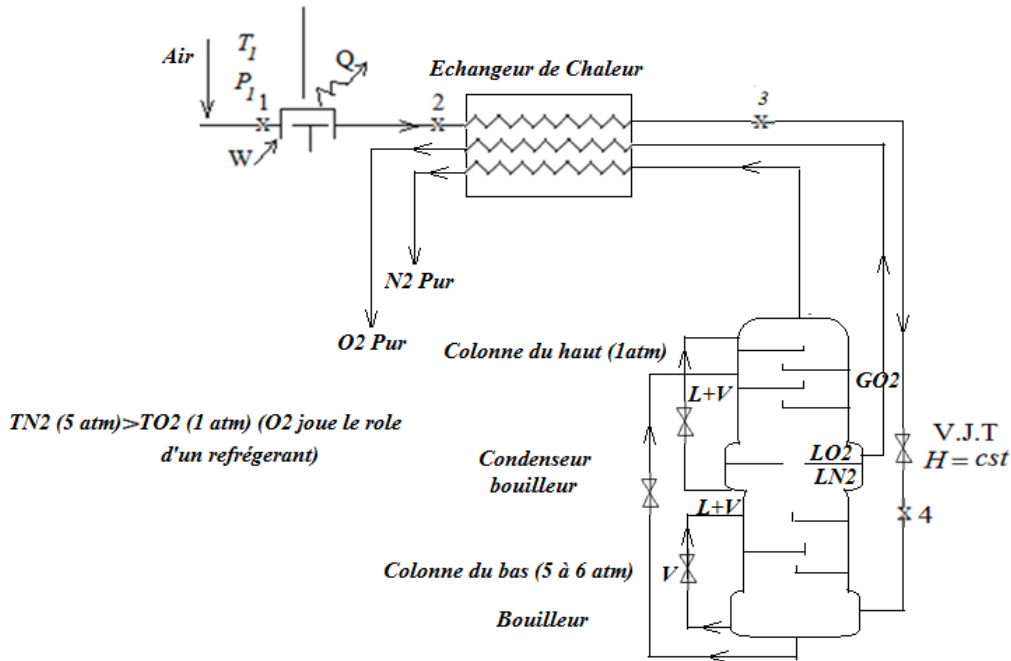
- Seulement de l'oxygène pur peut être produit
- Une large quantité d'O₂ est perdue dans le N₂.

L'imperfection du système de Linde à simple colonne a été remédié par un autre système qui est le système de Linde à colonne de rectification.

Dont la colonne de bas fonctionne à 1 P égale à 5 à 6 atm et celle de haut est opérationnelle à 1 atm. Sachant que à 5 atm est le point d'ébullition de N₂ pure qui est supérieure à celui du O₂ à 1 atm donc une réfrigération est requise par le N₂ en haut de la colonne du bas.

De l'air est comprimé la vapeur d'H₂O et le dioxyde de carbone est rejeté à l'extérieur l'air chaud est alors passé à travers un échangeur pour être refroidi l'échangeur. La chaleur peut-être à 3 courants si l'O₂ désiré est un gaz ou à 2 courants si il est liquide, l'air pré refroidi sera refroidi une seconde fois lorsqu'il passera dans le bouilleur de la colonne du bas, l'air refroidi est détendu à travers la vanne de JT et le mélange liquide-vapeur est introduit au milieu de la colonne du bas, le liquide va couler le long des plateaux à contre courant avec la vapeur qui monte du bouilleur, elle sera condensée lorsqu'elle atteindra le condenseur bouilleur en haut de la colonne du bas en ce point la vapeur est condensée, une partie du liquide N₂ remonte de la colonne d'en haut et l'autre partie coulera le long de la colonne du bas comme un reflux le N₂ liquide récupéré du bas de la colonne du bas sera le LN₂ pur, l'air liquéfié enrichi de l'azote est récupéré en bas de la colonne du bas détendu à travers une VJT une partie du liquide est vaporisée le tout est introduit au milieu de la colonne d'en haut cette vapeur continue de monter de la colonne du haut et s'enrichir

au fur et à mesure d' N_2 alors que le liquide coule le long de la colonne du haut s'enrichit en O_2 .



procédé de LIND Hampson à colonne de rectification

Colonne de rectification Une rectification est une cascade de plusieurs évaporations et condensations, les 2 se trouvent dans un contrecourant. Une colonne de rectification est une colonne qui permet la séparation d'un mélange contenant 2 corps ou plus. **3.4.**

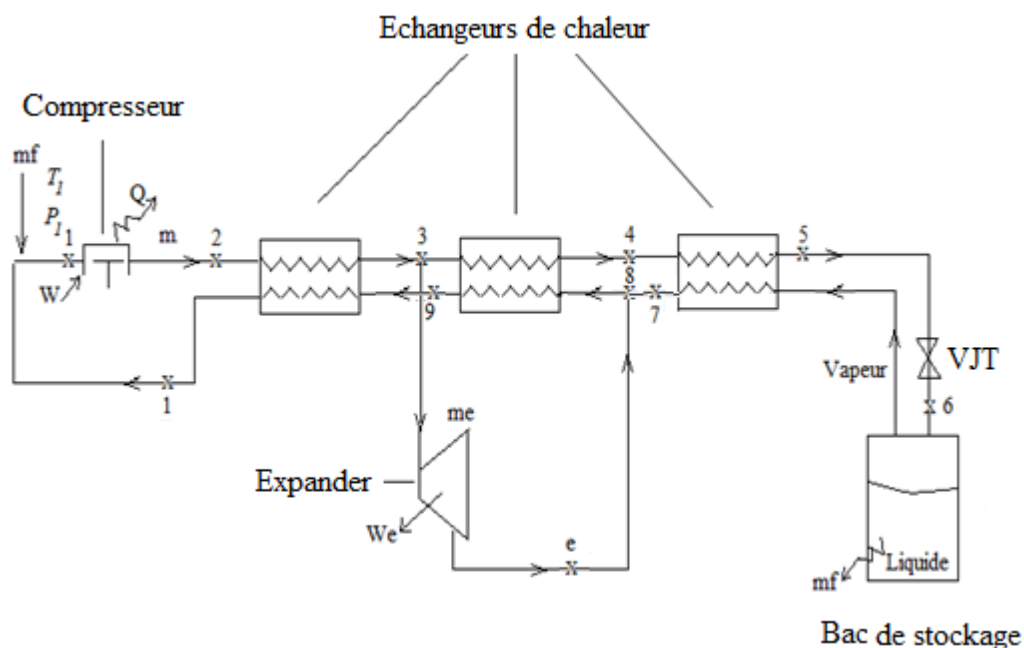
Explication du procédé au sein d'une Colonne de rectification: Les vapeurs saturées entrent dans la colonne de rectification directement dans le plateau d'alimentation la bulle d'air soumise à la température du plateau la quantité de chaleur de bouilleur va traverser les plateaux se trouvant au-dessus du plateau d'alimentation (la partie volatile au fur et à mesure et à mesure qu'elle remonte dans cette section elle s'enrichit de l'élément N_2 azote et s'appauvrit de l'élément O_2 . Elle gagne une quantité de vapeur N_2 et perd une quantité condensée d' O_2 , cette section est dite section riche en azote. L'azote ayant un point d'ébullition non élevé se volatilise plus vite et plus tôt que l' O_2 , la quantité de chaleur qui permet l'ébullition de la bulle au-dessous du plateau d'alimentation va subir le même mécanisme c'est-à-dire condensation et évaporation partielle du niveau de chaque plateau,

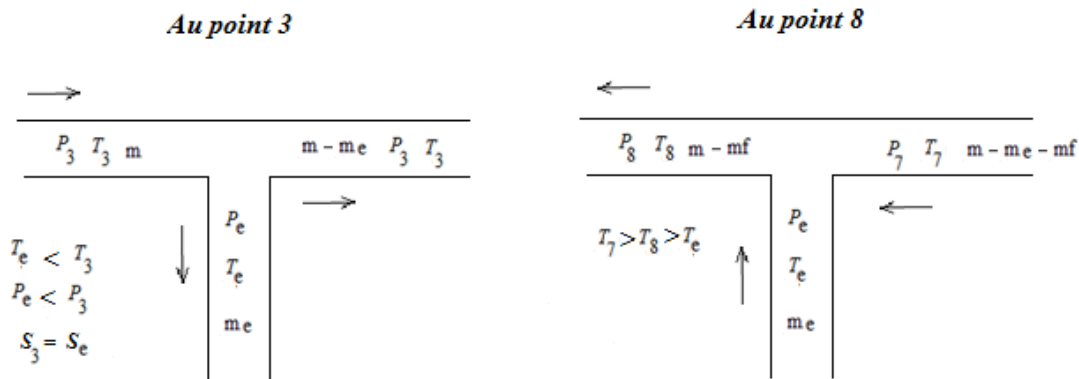
la quantité de chaleur dégagée par chaque condensation sera récupérée en haut de la colonne la bulle d'air plus elle descend plus elle s'appauvrit de N_2 et s'enrichit de O_2 elle est dite section pauvre.

Système de CLAUDE

L'expansion à travers une vanne est un processus irréversible thermodynamiquement parlant pour cela on veut s'approcher au maximum du système idéal, à cet effet pour un meilleur processus de production de basse température dans le système de Claude l'expander a été introduit pour atteindre les plus basses températures possible. Dans le système de Claude, le gaz est comprimé à l'aide du compresseur à 24 Mpa (40 atm) Puis passe dans le premier échangeur de chaleur ou 60 à 80% du gaz est dévillé de son chemin principale pour qu'il soit étendu dans un expander et pour qu'il soit retourné avec le flux de retour après le deuxième échangeur de chaleur. La vapeur parcourue vers le 2ème et le 3ème échangeur de chaleur pour se liquéfier et étendu par la VJT. La vapeur froide est retournée dans l'échangeur de chaleur pour qu'elle soit encore refroidie.

Une vanne de détente est encore nécessaire dans le système de Claude car le liquide à une compression plus faible que le gaz, par conséquent, si le liquide est formé dans le cylindre d'un moteur d'expansion ca entraîne des contraintes momentanées élevées





Procédé de Claude

Performance d'une machine thermique

MOTEUR MACHINE DE REFRIGERATION

En pratique, les performances d'une machine de réfrigération sont bien inférieures à la machine idéale

- ☐ Le rendement est essentiellement lié à la taille de la machine indépendamment de la température.
- ☐ Nécessité de limiter les transferts de chaleur vers

la source froide

Cycle de réfrigération

- Extraction de l'énergie du système à niveau constant
- Utilisation d'un fluide en cycle fermé

Cycle de liquéfaction

REFROIDISSEMENT DES GAZ

$$Q=0 \quad W=0$$

Vanne J.T.

Echangeur

Compresseur

Réfrigération

$$W > 0$$

$$Q < 0$$

ou

Turbine

$$Q > 0$$

$$W < 0$$

Echangeur

Echangeur

$$MBP = MHP$$

Cycle de réfrigération

- Extraction de l'énergie du système à niveau constant
- Utilisation d'un fluide en cycle fermé

Compression

Echange

Détente

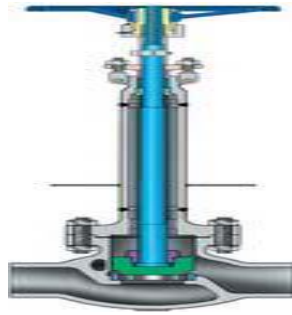
- Extraction de l'énergie à un gaz pour le liquéfier
- Une petite partie du débit HP se transforme en liquide, l'autre partie est utilisée à la réfrigération
- Un débit d'appoint compense le débit de liquide produit

Détente Joule-Thomson

☐ Détente par extraction d'énergie

La détente de Joule Thomson est une brusque chute de pression lors du passage du fluide à travers un orifice.

Détente à travers une vanne



Turbines de détente

Détente à travers une turbine

Haute pression Basse pression

Le gaz se détend en fournissant du travail à la turbine et ainsi se refroidit.

Toujours refroidissement lors d'une détente par extraction d'énergie.



Alimentation de liquide au gaz cryogénique

Les exigences globales sont de fournir le débit de gaz cryogénique liquéfié requis avec une perte minimale de qualité au point d'utilisation.

(La perte de qualité est définie comme une augmentation de la température du gaz cryogénique liquéfié et/ou une augmentation de la proportion de gaz dans le liquide).

Exigences générales pour le stockage de gaz cryogéniques liquéfiés.

Les réservoirs cryogéniques de conception standard sont acceptables et devraient être installés

conformément à la réglementation locale. Idéalement, les réservoirs devraient être situés le plus près possible du point d'utilisation et, si possible, être plus hauts que le point d'utilisation. La sortie de liquide devrait être prise directement au fond du réservoir et pas au moyen d'un tube plongeur.

La pression de service du réservoir devrait être adaptée à la pression de service surgélateur

alimentaire en tenant compte de la perte de charge dans la tuyauterie.

Pour l'azote, une pression du réservoir voisine de 3 bar effectifs est généralement préférée. Une régulation de pression du réservoir est requise pour maintenir cette pression.

Pour le dioxyde de carbone la pression du réservoir devrait être suffisante pour garantir une pression au point d'utilisation supérieure à 5,1 bar eff pour éviter le blocage de la tuyauterie par de la glace sèche. La pression typique du réservoir devrait être d'environ 14-20 bar eff.

Les dispositifs anti-surpression sont exigés sur les réservoirs de stockage. Ils ne sont pas des dispositifs de régulation de pression et ne fonctionnent que pendant des conditions anormales ou en cas d'urgence. S'ils fonctionnent cela indique un problème majeur.

Les disques de rupture ne doivent pas être installés sur les installations de dioxyde carbone à cause du risque de formation de glace carbonique dans le réservoir.

6.3 Règlementation

D'après la directive des équipements sous pression (PED) [3], l'azote et le dioxyde de carbone sont classés dans les fluides du groupe 2. Les réservoirs de stockage doivent être conçus conformément à la PED. Les canalisations de petits diamètres peuvent être construites conformément aux « codes de bonne pratique » de l'état membre concerné et n'ont pas besoin d'être marqués CE.

Conception de la canalisation

Une canalisation est conçue pour transférer une quantité donnée de gaz cryogénique liquéfié depuis le stockage jusqu'à l'application et ceci avec le minimum de perte de qualité. Elle devrait être isolée pour maintenir la qualité et éviter les blessures.

Les canalisations devraient être aussi droites et aussi courtes que possible. Eviter toute surélévation non nécessaire de la tuyauterie. Par exemple une élévation de 10 mètres de

la tuyauterie mène à une vaporisation de 3.5% du liquide (en poids).

Installer une purge de gaz s'il est nécessaire que le liquide arrive dès que la vanne d'alimentation de

l'application est ouverte. Installer cette purge au point le plus haut de la ligne, en amont de la vanne de l'application. Le gaz doit être rejeté dans un endroit sûr.

Installer un séparateur de phase si du liquide sans gaz est essentiel au point d'utilisation.

Les canalisations doivent être calculées pour donner la pression requise de gaz cryogénique liquéfié.

Installer une soupape de sécurité thermique sur chaque section de tuyauterie où du liquide peut être

piégé entre deux vannes.

Lorsque des soupapes de sûreté sont installées sur l'équipement de surgélation ou les tuyauteries à l'intérieur des bâtiments, elles doivent être tarées à une pression plus élevée que celles du réservoir et que celles qui sont à l'extérieur du bâtiment. Les événements doivent être canalisés jusqu'à une zone où ils ne présentent pas de danger

Technologies d'isolation

L'isolation est faite soit avec une tuyauterie isolée sous vide ou isolée avec de la mousse. L'isolation sous vide a une meilleure performance que la mousse.

Les courtes longueurs, vannes et accessoires sur le réservoir et le surgélateur et quelques raccords, devraient être isolées à la mousse pour permettre un accès facile pour la maintenance et les remplacements tout en réduisant les entrées de chaleur.

Les grandes longueurs sont de préférence isolées avec des tuyaux isolés sous vide pour réduire les entrées de chaleur et la génération de phase gazeuse qui en découle. Les lignes sous vide sont aussi plus hygiéniques pour l'utilisation dans les usines alimentaires. Les grandes longueurs d'isolation à la mousse peuvent cependant être utilisées dans le cas du dioxyde de carbone.

Le choix final est un compromis entre le coût la performance.

Les sections de tuyauteries qui sont accessibles aux opérateurs doivent être isolées ou protégées d'une autre manière.

L'oxygène ambiant peut se condenser sur les longueurs de tuyauteries d'azote liquide mal isolées et peut créer des risques dus à la suroxygénation (EIGA Doc 44, [4]).

Tuyauteries isolées sous vide

Les tuyauteries isolées sous vide sont toujours fournies par des fabricants spécialisés. Elles peuvent être rigides ou flexibles, bien que les rigides soient préférables.

Elles sont composées de deux tuyaux concentriques en acier inoxydable. Le tuyau intérieur contient le gaz cryogénique liquéfié. Le tuyau extérieur forme l'espace à vide. Pour l'azote liquide le tuyau intérieur comprend des soufflets de dilatation (environ tous les 6 mètres), pour éviter les contractions thermiques entre les tuyaux intérieurs et extérieurs.

Les lignes sous vide sont généralement préfabriquées en sections droites. Sinon elles peuvent aussi être fabriquées sur place. Il faut s'assurer que les lignes sous vide ont une pression de calcul adaptée à la pression requise pour l'application.

Lignes isolées à la mousse

Les lignes isolées à la mousse sont composées de :

- la tuyauterie de fluide en acier inoxydable ou en cuivre,
- l'isolation faite d'une ou plusieurs couches de mousse,
- La protection de l'isolation par une gaine en métal ou en plastique protégeant l'isolation

des impacts mécaniques et de l'humidité de l'air.

La mousse devrait avoir une conductibilité thermique aussi basse que possible ; cela dépend de sa densité. Il faut savoir que lorsque la mousse de polyuréthane brûle, elle libère des gaz toxiques.

Pour les canalisations d'azote liquide, la mousse à cellules ouvertes doit être évitée à cause du risque d'incendie dus à la liquéfaction de l'air

ambiant et donc de la concentration de l'oxygène. En plus, la condensation de l'eau peut endommager la mousse de l'isolation.

Première mise en service es canalisations (Isolations sous vide ou à mousse)

- S'assurer que la poussière, l'humidité et autres contaminants sont éliminés en purgeant la ligne avec un gaz inerte sec.
- S'assurer qu'il y a des indications sur la canalisation signalant le fluide et sa direction d'écoulement et qu'elles sont conformes à la réglementation locale de signalisation des canalisations.
- Isoler ou démonter les soupapes de sécurité, vannes, manomètres et les autres composants qui ont des pressions maximales en service inférieures à la pression d'épreuve de la canalisation.
 - Effectuer l'essai sous pression ou test de fuite, conformément aux normes de l'entreprise ou aux normes nationales (p.ex. essai à 1,1 x pression de calcul pour un essai pneumatique, ou 1,43 x pression de calcul pour une épreuve hydraulique).
 - Régler les soupapes de sécurité à la pression de calcul.
 - Emettre un procès-verbal d'essai / essai d'étanchéité si nécessaire.
 - Répéter la purge pour s'assurer qu'aucun contaminant n'a été introduit dans la ligne. Contrôler si les buses et filtres ne sont pas contaminés.

Exigences pour les équipements de surgélation et de conservation des aliments

7.1 Exigences de sécurité dans la conception des équipements

Toutes les machines de surgélation ou de réfrigération des aliments doivent être conformes aux législations Européennes et nationales et en particulier à la Directive Machines.

7.2 Echappement

Tous les équipements cryogéniques doivent être équipés d'un système d'extraction de gaz capable

d'évacuer tout le gaz cryogénique liquéfié qui peut être fourni.

Le système d'extraction de gaz doit être déterminé par le calcul de débit maximum de gaz cryogénique liquéfié au surgélateur, après prise en compte de la pression dans le réservoir, le degré de sous-refroidissement, le diamètre des vannes, restrictions et du collecteur.

Si l'extraction de gaz est en défaut il ne faut pas envoyer de gaz cryogénique liquéfié au surgélateur.

Il doit y avoir une méthode pour garantir qu'il y a bien un débit de gaz cryogénique liquéfié, dans la bonne direction, dans le collecteur d'extraction. Si la teneur en oxygène du local baisse en dessous d'une certaine valeur, ou si la teneur en dioxyde de carbone monte au dessus d'une certaine valeur, l'extraction des gaz doit être augmentée et l'alimentation en gaz cryogénique liquéfié doit être automatiquement isolée et de préférence directement sur le réservoir.

Autres exigences essentielles de sécurité

Si le surgélateur s'ouvre par inadvertance, l'alimentation en gaz cryogénique liquéfié doit être isolée.

Le surgélateur doit être fourni avec un deuxième circuit de température indépendant qui isole l'alimentation en gaz cryogénique liquéfié si une température très basse est détectée dans le surgélateur

L'équipement doit aussi être équipé de :

- une vanne manuelle accessible pour isoler le gaz cryogénique liquéfié,
- une vanne d'arrêt automatique du gaz cryogénique liquéfié,
- Une vanne de régulation du débit de gaz cryogénique liquéfié

Ebullition et éclaboussures

Les équipements de surgélation par immersion d'aliments dans l'azote liquide doivent être conçus

pour protéger le personnel contre les effets de l'ébullition et les éclaboussures d'azote liquide. Le

personnel doit être empêché d'entrer en contact avec l'azote liquide.

Fragilisation

Beaucoup de matériaux y compris les caoutchoucs et plastiques qui sont souples et pliables à la température ambiante, deviennent durs et cassants aux températures cryogéniques. Beaucoup de métaux ne sont pas appropriés pour le service cryogénique et en particulier l'acier doux. Les aciers inoxydables austénitiques sont les métaux de choix pour bien des applications cryogéniques