

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed
Boudiaf**

**Faculté de
Génie Mécanique**

**Département de
Génie Maritime**

Polycopié

Cryogénie

Cours

Destiné aux étudiants de Licence 3

Spécialité : Energétique

Préparé et présenté par:

Dr. ZEMANI FARAH

Année universitaire : 2023 /2024

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction générale et rappels de thermodynamique	1
1. Introduction	1
2. Informations sur l'utilisation des fluides cryogéniques	2
3. Applications de la cryogénie	3
3.1. Physique des hautes énergies	3
3.2. Applications médicales	4
3.3. Applications cryogéniques dans l'industrie médicale	4
3.4. Supraconductivité	5
3.5. Applications spatiales	6
3.6. Applications mécaniques	7
3.7. Applications cryogéniques dans l'industrie automobile	8
4. Le système thermodynamique	8
4.1. Transformations thermodynamiques	9
4.2. Gaz parfaits	10
4.3. Gaz réels	10
5. Premier principe de la thermodynamique	10
6. Second principe de la thermodynamique	11
7. Les états de la matière	11
8. Principes de production du froid	12
8.1. les modes de production de froid	
9. Procédés thermodynamiques	13
10. Diagramme enthalpique de Mollier	13
11. Rappels sur les cycles des machines frigorifiques à compression de vapeur	15
11.1. Cycle de Carnot inverse pour la production de froid	15
11.2. Cycle de référence des machines frigorifiques à compression de vapeur	16
11.3. Cycle de Pictet	18

Table des matière

11.4. Cycle à cascade à 3 étages pour production de froid à -161 °C	20
12. Définition de la détente	21
12.1. Détente de Joule-Thomson (procédé isenthalpique)	21
12.2. Effet Joule-Thomson	21
Chapitre 2 : Cycle à gaz (Brayton)	24
1. Détente isentropique avec production de travail	24
Chapitre 3 : Cycle de Rankine (cycle à changement de phase)	27
1. Définition	27
2. Différence avec le cycle de Carnot	27
3. Étude des cycles de turbine à vapeur à compression et détente	27
4. Bilan énergétique	28
Chapitre 4 : Liquéfaction du gaz naturel et travail minimum	30
1. Historique de la liquéfaction du gaz naturel	30
2. Définition	30
3. Fonctionnement technique	31
4. Liquéfaction du gaz naturel	31
5. Travail minimum de liquéfaction	33
Chapitre 5 : Cycles réels de liquéfaction	35
1. Cycles à cascade classique et à cascade incorporée	35
1.1. Cycle à cascade classique	35
1.2. Cycle à cascade incorporée de liquéfaction du GN	37
Chapitre 6 : Méthodes industrielles d'obtention des basses températures	40
1. Cycle de Linde	40
1.1. Cycle de réfrigération	40
1.2. Cycle de liquéfaction	40
2. Comparaison entre détente isenthalpique et isentropique	42
3. Cycle de Claude, Heylandt ou Kapitza	43

Table des matière

3.1. Cycle de Claude	43
3.2. Cycle de Kapitza	44
3.3. Cycle de Heylandt	45
4. Application à la production de froid	46
5. Application à la liquéfaction	47
6. Cycle de Claude MP (30 bar)	48
Exercices	49
Références bibliographiques	55

Préface

La cryogénie, science dédiée à la production, au contrôle et à l'utilisation des très basses températures, constitue le fondement de nombreuses technologies essentielles, souvent invisibles mais omniprésentes dans notre quotidien. Ce cours se veut une référence pratique visant à encourager l'exploitation et l'innovation dans les domaines scientifiques et technologiques liés à la cryogénie.

Destiné aux étudiants de troisième année de Licence en Génie Mécanique, spécialité Énergétique (dans le cadre du système L.M.D.), ce support intègre de nombreux exemples d'applications concrètes afin d'illustrer les concepts étudiés.

Le contenu est structuré en six chapitres, précédés d'une introduction générale avec des rappels de thermodynamique intégrés dans le **chapitre 1**, nécessaires à la maîtrise des notions qui suivent.

- Le **chapitre 2** est consacré au cycle à gaz de Brayton.
- Le **chapitre 3** présente le cycle de Rankine, basé sur un changement de phase.
- Le **chapitre 4** aborde en profondeur la liquéfaction du gaz naturel, en mettant en lumière son principe et le travail minimum requis.
- Le **chapitre 5** examine les cycles réels de liquéfaction.
- Le **chapitre 6** expose les principales méthodes industrielles d'obtention des basses températures.

Le document se conclut par une série d'exercices permettant de consolider les acquis.

Ce travail est le résultat de la consultation attentive de divers ouvrages et publications, dont la majorité figure dans la section des références bibliographiques.

Chapitre 1 : Introduction générale et Rappels thermodynamique

1. Introduction

Le terme **cryogénie** provient du grec kruos (froid) et genesis (engendrer, produire). Elle désigne l'ensemble des techniques visant à produire et à utiliser des très basses températures, généralement inférieures à 120 K (-150°C).

La température de -153,15 °C marque la limite en dessous de laquelle les gaz présents dans l'air commencent à se liquéfier (transition vers la phase liquide).

$$T [\text{Kelvin}] = T [^{\circ}\text{C}] + 273.15$$

Fluides cryogéniques (cryofluides) ou machines (cryogénérateurs) :

Gaz	Point d'ébullition (°C)	Volume d'expansion du gaz	Toxicité
Acétylène	-84	—	+
Acide chlohydrique	-85	—	+
Azote	-195	696 à 1	—
Argon	-185	847 à 1	—
Dioxyde de carbone	-78	553 à 1	+
Hélium 3	-269	757 à 1	—
Hélium 4	-268	757 à 1	—
Hydrogène	-252	851 à 1	—
Méthane	-161	578 à 1	—
Monoxyde de carbone	-192		++
Oxygène	-183	860 à 1	—
Trifluorure de bore	-100		+



Figure 1.1 : bonbonne contenant de l'azote liquide

2. Information sur l'utilisation des fluides cryogéniques:

Mise en place de panneaux de signalisation indiquant la présence de fluides cryogéniques et le risque d'asphyxie dans les locaux possédant l'installation cryogénique.

	Panneau de signalisation pour la présence de fluides cryogéniques	L'utilisation des installations cryogéniques doit se faire par une personne qualifiée. Il devra suivre régulièrement une formation sur les règles de sécurité et les risques liés à l'utilisation des fluides cryogéniques.
	Panneau de signalisation avertissant le risque d'asphyxie	L'instruction de sécurité IS 47 « Utilisation des fluides cryogéniques » contient des informations sur les systèmes mettant en œuvre des fluides cryogéniques, les risques qu'ils présentent et les règles de sécurité applicables. Il est publié par la division de l'inspection technique et de la sécurité (TIS) du CERN (Organisation européenne pour la recherche nucléaire).

3. Applications de la cryogénie

La cryogénie joue un rôle clé dans de nombreux domaines scientifiques, industriels et médicaux. Elle permet la réduction du volume des gaz par liquéfaction, facilitant leur stockage et transport. Elle est utilisée pour la séparation des gaz comme l'hélium, grâce à la condensation ou l'adsorption. Les très basses températures permettent aussi de ralentir les réactions chimiques, d'où son usage en surgélation et en cryoconservation. Elle rend possible la supraconductivité, phénomène essentiel pour certaines technologies avancées. Le refroidissement cryogénique améliore la sensibilité des instruments de détection en réduisant le bruit thermique. Enfin, le traitement cryogénique des matériaux augmente leur résistance et durabilité, particulièrement dans les secteurs de haute performance.

3.1. Physique des hautes énergies :

Le CERN (Centre européen pour la recherche nucléaire, aujourd'hui l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire) est un centre européen de physique des particules situé sur la frontière franco-suisse.

Grand collisionneur de hadrons : Le LHC (Large Hadron Collider) est l'accélérateur de particules le plus grand et le plus puissant du monde. Un anneau de 27 kilomètres de circonférence formé de milliers d'aimants supraconducteurs, doté de structures accélératrices pour accroître l'énergie des particules à chaque passage, conduisant l'électricité sans résistance ni perte d'énergie, les aimants doivent être refroidis à - 271°C, une température plus froide que celle de l'espace intersidéral par **l'hélium liquide**.

À l'intérieur de l'accélérateur, deux faisceaux de particules circulent à des énergies très élevées et à une vitesse proche de celle de la lumière avant de rentrer en collision l'un avec l'autre.

Le LHC a été construit pour aider les scientifiques à répondre à certaines questions essentielles de la physique des particules qui restent sans réponse. L'énergie sans précédent qu'il atteindra pourrait même révéler des résultats tout à fait inattendus (découvrir l'inconnu, ouvrir des portes vers des domaines encore inexplorés de la physique).



Figure 1.2 : Grand collisionneur de hadrons : Le LHC

Ces collisions permettent aux physiciens de sonder l'infiniment petit. Lorsque les particules sont suffisamment énergétiques, il se produit un phénomène qui défie le sens commun : l'énergie de la collision se transforme en matière.

3.2. Applications Médicales

La cryothérapie est une nouvelle technique dans laquelle les tissus nuisibles sont détruits en les congelant à une température cryogénique. Cette technique permet un séjour hospitalier plus court, moins de perte de sang et un petit temps de récupération. Il est généralement utilisé chez les patients atteints de cancer localisé de la prostate et du rein, des troubles de la peau, des problèmes de rétine, etc. Les systèmes sont développés pour préserver les cellules sanguines, les cellules plasmatiques, les organes humains et les organes des animaux aux températures cryogéniques.

3.3. Applications cryogéniques dans l'industrie médicale

Le maintien de la qualité est un avantage clé du refroidissement cryogénique. C'est l'une des raisons pour lesquelles la technologie cryogénique est devenue si populaire dans l'industrie médicale au cours des dernières décennies.

Deux applications cryogéniques bien connues dans l'industrie médicale sont la station de remplissage de dewars (réservoir) et la cryoconservation. En outre, les traitements de santé dans un cryosauna sont de plus en plus courants.

-Stations de remplissage sont des réservoirs cryogéniques utilisés pour stocker et distribuer des gaz liquéfiés comme l'azote liquide, l'oxygène ou l'hélium. Indispensables dans les hôpitaux pour la réfrigération des IRM, ou la fourniture d'oxygène médical. Par exemple traiter certaines lésions cutanées (cryochirurgie) et la conservation d'échantillons biologiques (cellules, tissus, sang, gamètes, etc.) en cryobiologie ou dans les banques de cellules.

-**Les cuves de cryoconservations** sont utilisées pour conserver les matériaux biologiques -196 °C grâce à l'azote liquide dans des conditions optimales. Dans les institutions médicales, les cuves de cryoconservations sont souvent situées dans une biobanque qui est équipée d'une ligne sous vide permettant la distribution automatique d'azote liquide à plusieurs cuves de cryoconservations l'azote liquide nécessaire à leur fonctionnement.

Un **cryosauna** est refroidi par de la vapeur d'azote liquide ou par de l'air refroidi par de l'azote liquide. Ce traitement est populaire principalement dans les services de sport, de réadaptation et de bien-être. Le patient est exposé pendant quelques minutes à des températures de -110 °C à -140 °C pour réduire l'inflammation, soulager les douleurs ou améliorer la récupération musculaire.

3.4. La supraconductivité

Ce phénomène, découvert il y'a cent ans, est une manifestation particulièrement marquante de la physique quantique à l'échelle humaine : les nombreux électrons du matériau se regroupent dans une même onde quantique qui s'étend sur de très grandes distances.

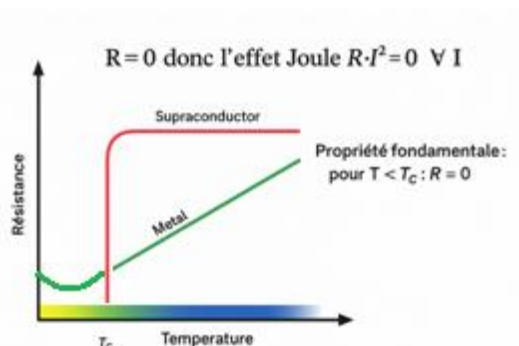


Figure 1.3 : la supraconductivité

À l'état supraconducteur, un matériau refroidi à très basse température acquiert la capacité de conduire parfaitement un courant électrique, sans résistance (l'absence de résistance électrique et l'expulsion du champ magnétique — l'effet Meissner), et donc sans perte d'énergie. Parmi ses applications :

- NMR (Nuclear Magnetic Resonance) est utilisé par l'industrie pharmaceutique pour étudier la structure moléculaire.
- Les machines IRM (imagerie par résonance magnétique) sont utilisées pour la numérisation corporelle.
- Les aimants du scanner RMN et IRM sont refroidis par l'hélium liquide.



Figure 1.4 :NMR (Nuclear Magnetic Resonance)



Figure 1.5 : machines IRM

-Maglev Locomotion, Transformateur et générateurs

Un train à sustentation magnétique ou Maglev utilise les forces magnétiques pour se déplacer. Il utilise le phénomène de sustentation électromagnétique entre des aimants supraconducteurs sur le véhicule et des bobines sur le sol, et n'est donc pas en contact avec des rails, contrairement aux trains classiques. Ce procédé permet de supprimer la résistance au roulement et d'atteindre des vitesses plus élevées : le record est de 603 km/h , soit 28,2 km/h de plus que le record d'un train classique.



Figure 1.6 : TGV japonais Maglev



Figure 1.7 : Transrapid 09 sur le site d'essai d'Emsland en Allemagne.

3.5. Applications Spatiales

La cryogénie joue un rôle clé dans les applications spatiales, notamment dans la propulsion des fusées et le refroidissement des équipements sensibles :

- **Propulsion des fusées** : Les moteurs cryogéniques utilisent des carburants cryogéniques, tels que l'hydrogène liquide comme carburant et l'oxygène liquide comme oxydant. Ces deux éléments doivent être stockés à des températures

extrêmement basses (-253°C pour l'hydrogène, -182°C pour l'oxygène) et sont utilisés pour générer une poussée maximale dans les moteurs spatiaux.

Dans un moteur chimique, l'énergie pour l'expulsion des gaz provient d'une réaction de combustion entre le carburant (hydrogène) et l'oxydant (oxygène). Ce couple hydrogène-oxygène est particulièrement efficace dans les moteurs spatiaux, produisant une poussée optimale avec un faible taux de consommation de carburant.

- **Refroidissement des détecteurs infrarouges (IR) et télescopes :** Les détecteurs IR, sondes et autres instruments spatiaux nécessitent un refroidissement cryogénique pour fonctionner avec une haute précision. Cela inclut également le développement de cryoréfrigérateurs miniatures pour les satellites, afin d'améliorer leur fiabilité et la précision des observations.
- **Simulations spatiales :** Les chambres de simulation spatiale créent un environnement réaliste pour tester les engins spatiaux. Elles simulent le froid de l'espace à des températures cryogéniques et nécessitent des cryopompes pour maintenir les niveaux de vide élevés.

3.6. Applications Mécaniques

La cryogénie est utilisée dans plusieurs domaines mécaniques avancés. Grâce aux aimants supraconducteurs, elle permet la séparation magnétique de matériaux pour améliorer la pureté du kaolin ou du quartz. Le traitement thermique cryogénique prolonge la durée de vie des outils, moules, pièces forgées et même des cordes de guitare, qui deviennent plus résistantes et nécessitent moins d'entretien. Elle est également utilisée dans le recyclage de matériaux comme le PVC et les caoutchoucs, en facilitant leur transformation à très basse température.

3.7. Applications cryogéniques dans l'industrie automobile

La cryogénie joue un rôle varié et essentiel dans l'industrie automobile. L'azote liquide y est couramment utilisé pour des opérations telles que le fretage de pièces mécaniques ou la détection de fuites dans les circuits. Parmi les applications les plus répandues, on trouve également l'utilisation de bacs de refroidissement, partagés avec l'industrie de l'énergie, permettant un contrôle précis des températures lors de procédés sensibles.

Le bac de refroidissement joue un rôle clé, notamment pour les ajustements par rétraction. Ce procédé consiste à plonger une pièce métallique dans un caisson

réfrigérant rempli d'azote liquide, afin de la contracter à très basse température. Cette contraction permet un assemblage facilité, par exemple dans un bloc moteur. Une fois la pièce revenue à température ambiante, elle se dilate et se fixe solidement en place.

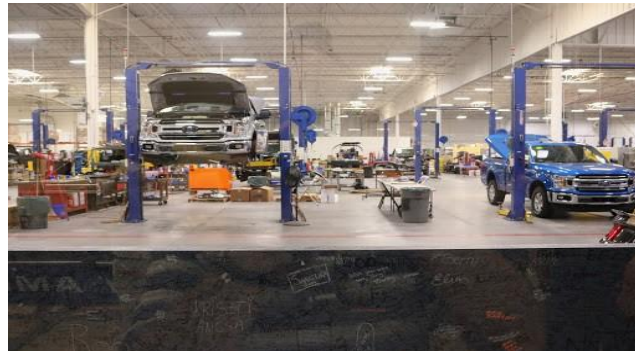
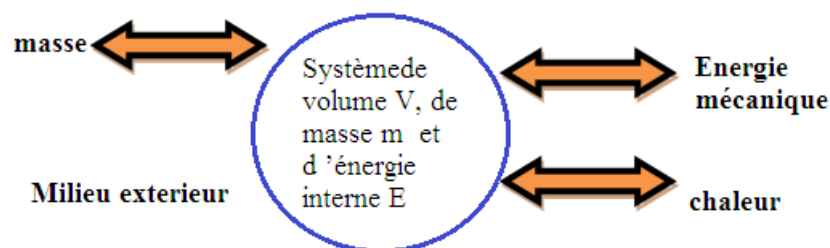


Figure 1.8 : Le bac de refroidissement

4. Le système thermodynamique



Un système est dit isolé lorsqu'il est entouré d'une paroi rigide, imperméable et adiabatique, empêchant tout échange de matière, de chaleur ou de travail avec l'environnement extérieur.

Une paroi mobile, perméable et diatherme permet, selon les cas, des échanges de matière et/ou de chaleur, voire du travail mécanique.

Un système thermodynamique est une portion d'espace limitée par une surface fermée, encore appelé volume de contrôle, qui contient une certaine quantité de Matière. Cette surface fermée, encore appelée frontière du système peut être fixe ou mobile. Tout ce qui est au-delà de la frontière est appelé milieu extérieur

-Système thermodynamique Fermé : le système échange de l'énergie, mais pas de matière avec le milieu extérieur.

-Système thermodynamique Ouvert : le système échange de la matière et de l'énergie avec le milieu extérieur.

- **Fonctions d'état** : L'état thermodynamique d'un système est caractérisé par divers grandeurs nommées fonction d'état : la pression P, La température T, Le volume V, L'énergie interne U, L'enthalpie H, L'entropie S

Variable extensive: une grandeur qui est proportionnelle à la taille du système que cette grandeur caractérise.(exemples : énergie, volume, masse, nombre de molécules)

Variable intensive: est une grandeur qui ne dépend pas de la quantité de matière en présence dans le système considéré (exemples : pression, température, masse volumique, viscosité)

4.1. Transformation thermodynamique

Une transformation thermodynamique est l'opération au cours de laquelle l'état thermodynamique d'un système se modifie en passant d'un état initial à un état final.

Un système peut subir une seule transformation [de (1) à (2)] ou parcourir une suite de transformations [(1) ----(2); (2) ----(3); (3) --- (4)...] à :

- pression constante transformation **isobare**
- température constante transformation **isothermique**
- volume constante transformation **isochore**
- énergie interne constante transformation **isoénergétique**
- enthalpie constante transformation **isenthalpique**
- entropie constante transformation **isentropique**
- Transformation sans échange de chaleur entre le système et le milieu extérieur est dite **adiabatique**

4.2. Gaz parfait

Un gaz parfait est un modèle théorique dans lequel les molécules n'interagissent pas entre elles. Il représente le cas limite de **faible densité moléculaire**, où la distance moyenne entre les particules est suffisamment grande pour que les interactions intermoléculaires soient négligeables.

L'équation d'état du gaz parfait a été déterminée expérimentalement au 18^{ème} siècle sur l'air dans un domaine limité de pression et de température. Elle s'écrit :

$$PV = nRT$$

p : pression du gaz (Pa) ;

n : nombre de moles de gaz (mol) ;

R : constante des gaz parfaits = 8,314 J.K⁻¹ .mol⁻¹

V : volume du gaz (m³)

T : température du gaz (Kelvin, K)

4.3. Gaz réels

Les gaz parfaits **ne peuvent pas être liquéfiés** car ils sont modélisés sans interaction entre les molécules. Pour représenter le comportement des gaz réels, on utilise souvent le modèle de **van der Waals**, qui prend en compte la taille finie des molécules et les forces d'attraction intermoléculaires, lesquelles diminuent lorsque le volume molaire augmente. Les gaz réels **peuvent se liquéfier** sous certaines conditions de température et de pression. Par ailleurs, des tables thermodynamiques permettent également de caractériser précisément les gaz réels.

5. Premier principe de la thermodynamique

La première loi de la thermodynamique est généralement considérée comme la moins exigeante à comprendre, car il s'agit d'une extension de la loi de conservation de l'énergie, ce qui signifie que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite.

Pour un système fermé évoluant entre deux états d'équilibre thermodynamique Initial (I) et Final (F), la variation d'énergie totale ΔE_{tot} est égale à la somme du travail W et du transfert thermique Q reçus du milieu extérieur :

$$\Delta E_{\text{tot}} = \Delta E_{\text{tot}}(F) - \Delta E_{\text{tot}}(I)$$

$$\Delta U = W + Q$$

ΔE_{tot} : variation d'énergie totale

U : énergie interne du système

W : travail (des forces non conservatives) reçu du milieu extérieur

Q : transfert thermique reçu du milieu extérieur

6. Second principe de la thermodynamique

Pour tout système fermé, il existe une fonction d'état S extensive, non conservative, appelée entropie, telle que sa variation lors d'une transformation entre deux états d'équilibre est la somme de l'entropie échangée $S_{\text{éch}}$ avec le milieu extérieur et de l'entropie créée $S_{\text{créée}}$ dans le système. L'entropie créée $S_{\text{créée}}$ est nécessairement positive ou nulle.

$$\Delta S = S_{\text{éch}} + S_{\text{créée}}$$

ΔS : variation d'entropie lors de la transformation (en J.K^{-1})

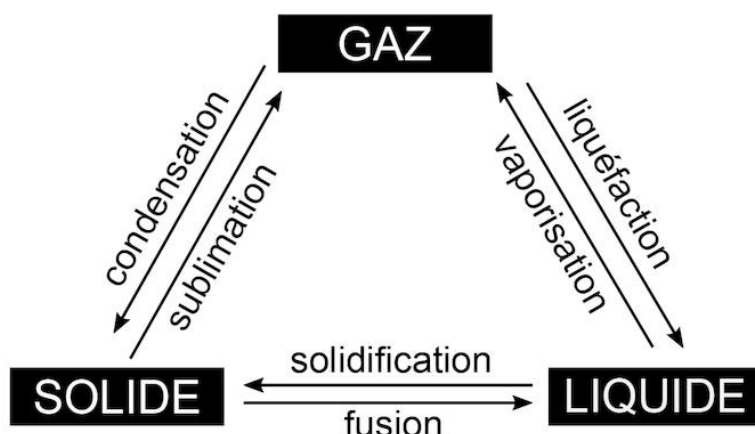
$S_{\text{éch}}$: entropie échangée avec le milieu extérieur (en J.K^{-1})

$S_{\text{créée}}$: entropie créée dans le système : transformation irréversible $S_{\text{créée}} > 0$;
transformation réversible $S_{\text{créée}} = 0$

Transformation	Constante	δW et W	δQ et Q	variation d'énergie
Isochore	$V = \text{Cte}$	$\delta W = -pdV = 0$ $W = 0$	$\delta Q = nC_V dT$ $Q = nC_V(T_2 - T_1)$	$dU = nC_V dT$ $\Delta U = nC_V(T_2 - T_1)$
Isobare	$p = \text{Cte}$	$\delta W = -pdV$ $W = -p(V_2 - V_1)$	$Q = nC_p(T_2 - T_1)$	$\Delta H = nC_p(T_2 - T_1)$
Isotherme	$T = \text{Cte}$	$\delta W = -pdV$ $\delta W = -nRT \frac{dV}{V}$ $W = -nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$	$Q = -W$	$\Delta U = 0$
Adiabatique	$pV^\gamma = \text{Cte}$	$W = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\gamma - 1}$	$Q = 0$	$\Delta U = W$

7. Les états de la matière

Le changement d'état se définit comme la phase de transformation d'une phase vers une autre phase, changements d'état (ou changements de phase)



- ✓ Sublimation de la glace carbonique (glace sèche) qui est à -78.5°C à l'état solide
- ✓ condensation de vapeurs de diiode qui se condensent sous forme de cristaux sur des parois froides, sans passage par l'état liquide, aussi L'iode, dont le point de fusion est à $113,5^\circ\text{C}$, s'évapore nettement en dessous de cette température. Il passe directement de l'état solide à l'état gazeux. Ce processus est connu sous le nom de sublimation.



Figure 1.9 : Vapeurs de diiode qui se condensent sous forme de cristaux



Figure 1.10 : Glace sèche dans une cuillère

8. Les principes de production du froid

Produire du froid consiste à absorber de la chaleur à une température inférieure à celle de l'ambiance, à l'aide d'un mécanisme endothermique. La chaleur extraite est ensuite rejetée dans l'air ou l'eau environnants.

Parmi ces mécanismes, on distingue :

- Les procédés thermodynamiques : dissolution, détente de gaz, évaporation, fusion, sublimation.
- Les procédés électriques ou magnétiques : effet Peltier, désaimantation adiabatique.

8.1. Les modes de production du froid

La production de froid peut se faire selon deux modes :

- **en circuit ouvert** : le fluide frigorigène entre en contact (direct ou indirect) avec le produit à refroidir, puis est rejeté à l'extérieur sans être recyclé. Exemples : azote liquide, air détendu, glace. Ses avantages : simplicité, faible coût d'investissement, souplesse. Inconvénient : coûts d'exploitation élevés, besoin d'un fluide peu toxique et bon marché.
- **en circuit fermé** : le fluide frigorigène circule dans un système fermé sans contact direct avec le produit à refroidir. Il passe par les étapes de compression, condensation, détente et vaporisation. Le froid est transmis soit par les parois de l'évaporateur, soit via un fluide intermédiaire (air, eau glycolée, saumure, etc.). Ses avantages : utilisation plus contrôlée et efficace, adaptée à de nombreux procédés industriels. Les procédés en circuit fermé évitent les pertes de fluide, mais nécessitent des investissements élevés et offrent moins de souplesse. Malgré ces inconvénients, ils sont les plus utilisés.

9. Les procédés thermodynamiques

Ces procédés sont couramment utilisés principalement pour la liquéfaction des gaz.

Dans la plupart des cas, le moyen de production frigorifique est retenu en fonction de l'application qui sera faite du froid produit.

On rencontre **4 types de procédés** permettant de produire de très basses températures et ainsi liquéfier les gaz.

- ☐ Procédé utilisant les cycles frigorifiques à **compression de vapeur** en cascade (**cycles à cascade**)
- ☐ Procédé utilisant la **détente isenthalpique** ou **détente sans production de travail extérieur** appelée effet Joule- Thomson (**cycle de Linde**)
- ☐ Cycle utilisant la **détente isentropique** ou **détente avec production de travail extérieur** (**cycle de brayton**)
- ☐ Procédé associant **la détente isenthalpique et la détente isentropique** (**cycle de Claude, Heylandt ou Kapitza**)

10. Le diagramme enthalpique de MOLLIER

Le diagramme de [Mollier](#) permet de connaître l'état du réfrigérant en fonction de la pression et de l'enthalpie. Il a été déduit de la relation pression – température existant dans les gaz liquéfiables. Ce diagramme porte en abscisses, l'enthalpie **h** en **kJ/kg** (contenu en énergie du fluide) et en ordonnées, la pression absolue **P** sur une échelle logarithmique en **bars** (10^3 Pa).

Chaque fluide frigorigène possèdera donc un diagramme ($\log P, h$) qui lui est propre.

Le **diagramme enthalpique** de MOLLIER permet donc sans calcul :

- ✓ de relever les paramètres physiques d'un fluide dans un état physique donné.
- ✓ de tracer le cycle fonctionnel d'une installation frigorifique pour un fluide déterminé en fonction des températures (ou pressions) d'évaporation et de condensation.

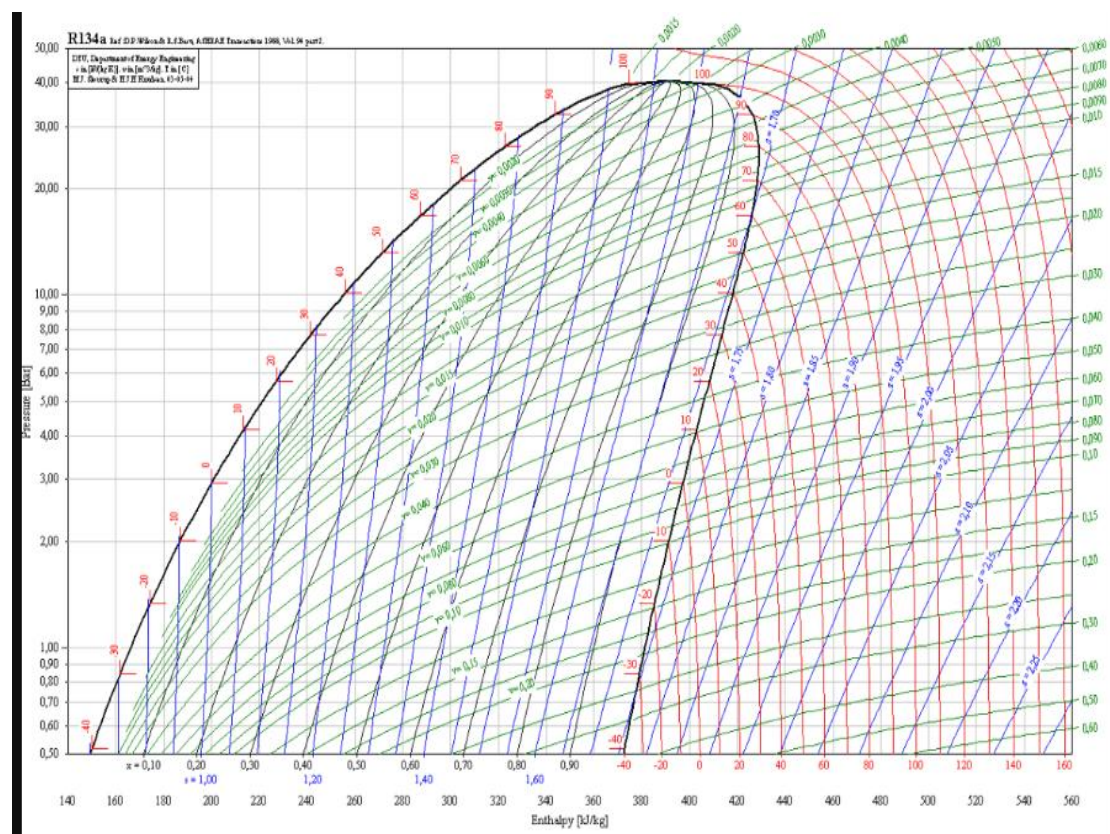
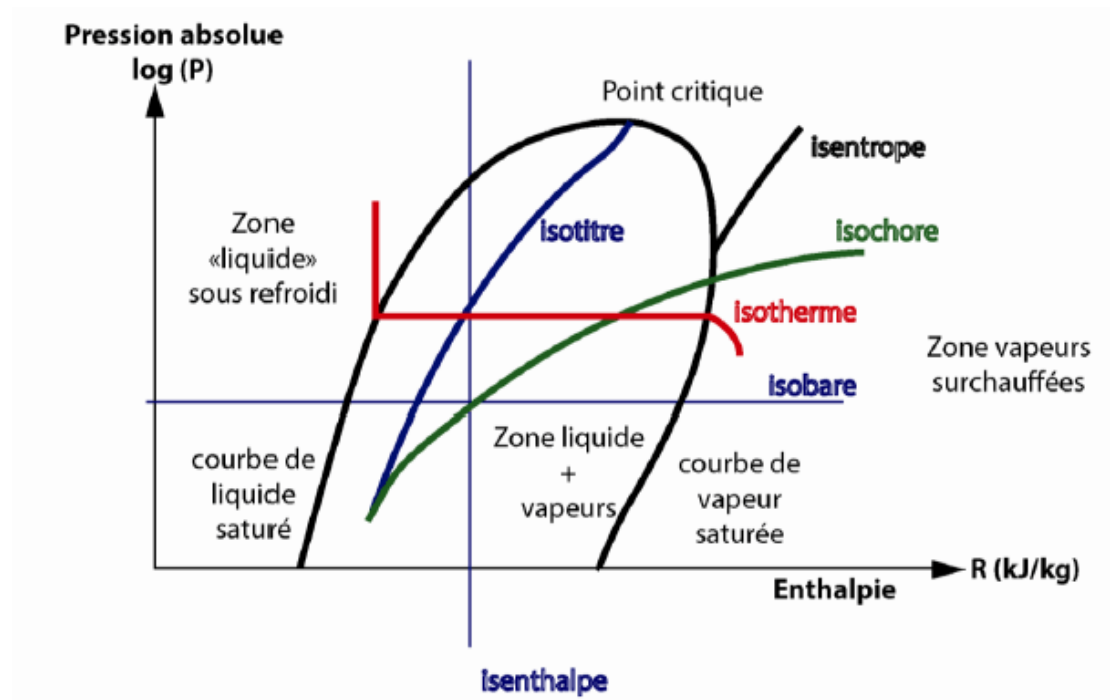


Figure 1.11 : Diagramme enthalpique

11. Rappels sur les cycles des machines frigorifiques à compression de vapeur

11.1. Cycle de Carnot inverse pour la production de froid

Il se compose de 2
adiabatiques réversibles
(isentropiques) et 2
isothermes
On suppose :
Régime permanent
Transformations idéales
Le fluide de travail du cycle
est un gaz parfait

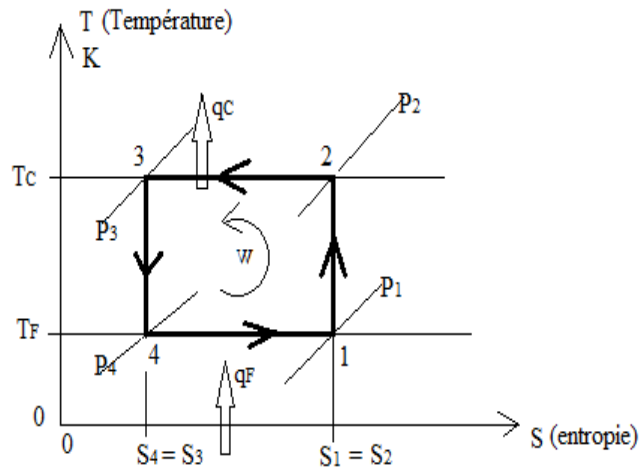


Figure 1.12 : Cycle de Carnot inverse sur le diagramme entropique

T_F = température du milieu froid (source froide)

q_F = quantité de chaleur à extraire du milieu froid pour le maintenir à T_F (égale à la production de froid)

T_C = température du réservoir d'énergie thermique (source chaude)

q_C = quantité de chaleur rejetée par le cycle dans le réservoir d'énergie thermique

W = travail fourni au cycle

On a $q_C + q_F + W = 0$ (1^{er} principe)

$$q_C = T_C (S_4 - S_3) = \Delta S_{34} \quad \text{et} \quad q_F = T_F (S_2 - S_1) = \Delta S_{12}$$

$$\Delta S_{34} = -\Delta S_{12}$$

Le travail est donné par la relation :

$$W = -(q_C + q_F) = -\Delta S_{12} (T_F - T_C) = \Delta S_{12} (T_C - T_F)$$

Le coefficient de performance de Carnot est donné par la relation :

$$(COP)_C = \frac{q_f}{W} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Le COP des machines réelles sera toujours inférieur au COP de Carnot pour les mêmes températures. Il sert de référence pour les machines réelles.

On peut noter que si T_F diminue alors $(COP)_C$ diminue ; il en est de même pour les machines frigorifiques réelles.

11.2. Le cycle de référence des machines frigorifiques à compression de vapeur

On suppose :

- le régime permanent
- les pertes de chaleur et les pertes de charge sont nulles
- le fluide de travail est un fluide frigorigène simple (les changements de phase se font à température et pression constante)
- pas de surchauffe à l'évaporateur et pas de sous refroidissement
- Les principaux éléments de ce type de machine sont : le compresseur, le condenseur, le détendeur, l'évaporateur, les canalisations qui relient les éléments entre eux
- le fluide de travail appelé fluide frigorigène

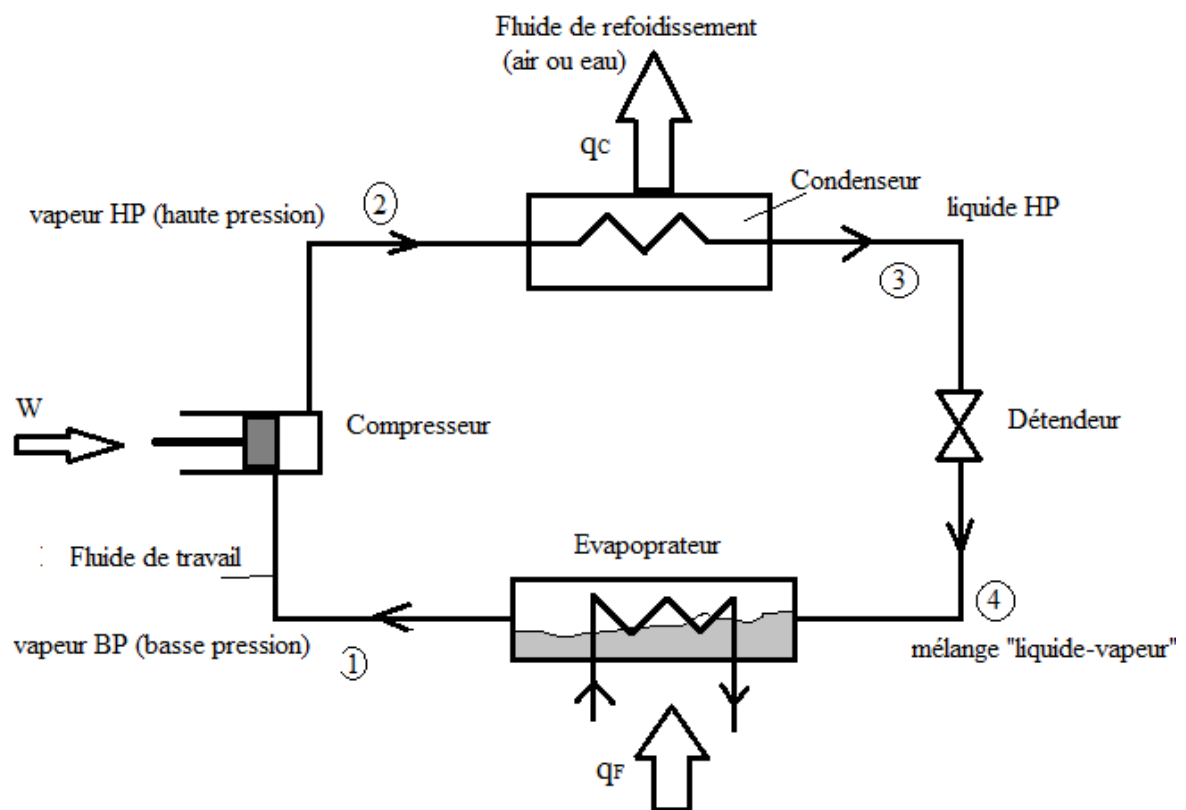


Figure 1.13 : Machine frigorifique à compression de vapeur élémentaire

Le cycle théorique de la machine frigorifique à compression de vapeur (sans surchauffe et sans sous refroidissement) est présenté sur les diagrammes figure 1.14 et 1.15 :

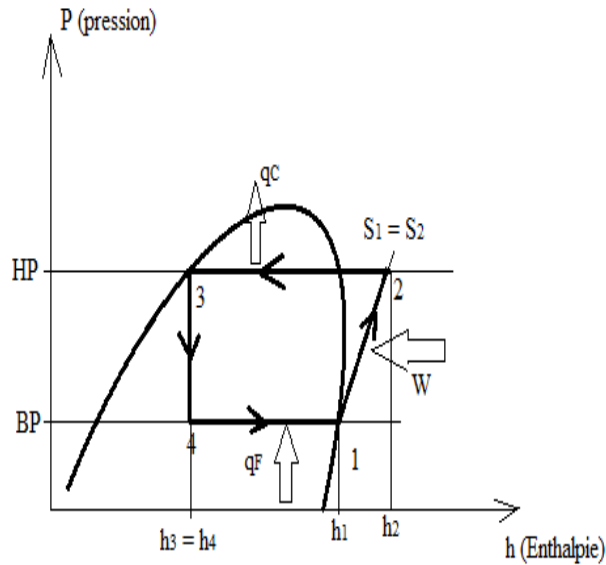


Figure 1.14 : Cycle théorique de la machine frigorifique à compression de vapeur sur le diagramme 'pression –enthalpie'

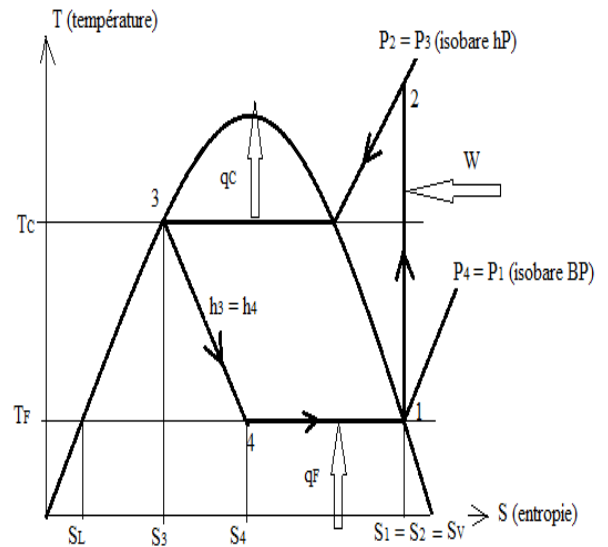


Figure 1.15 : Cycle théorique de la machine frigorifique à compression de vapeur sur le diagramme entropique.

Transformation 1-2 : compression isentropique

Transformation 2-3 : isobare (désurchauffe et condensation)

Transformation 3-4 : détente isenthalpique (à enthalpie constante $h_3 = h_4$)

Transformation 4-1 : isobare (évaporation)

On rappelle les principales grandeurs caractéristiques de la MF :

- production de froid ou effet frigorifique (**évaporateur**)

$$q_0 = q_F = h_1 - h_4 \text{ en kJ/kg} \quad (2)$$

- travail de compression isentropique (**compresseur**)

$$W = h_2 - h_1 \text{ en kJ/kg} \quad (3)$$

- quantité de chaleur cédée au fluide de refroidissement du **condenseur**

$$q_C = h_2 - h_3 \text{ en kJ/kg} \quad (4)$$

- coefficient de performance de la MF

$$(COP)_{MF} = \frac{q_0}{W} = \frac{h_1 - h_2}{h_2 - h_1} \quad (5)$$

11.3. Cycle de Pictet

Ce cycle se caractérise par l'insertion d'un sous-refroidisseur avec régénération des vapeurs froides provenant de l'évaporateur.

Le cycle de Pictet présente plusieurs avantages, notamment dans le domaine de la cryogénie et de la liquéfaction des gaz, tel que l'amélioration du rendement énergétique, meilleure gestion de la température, réduction de la consommation de fluide frigorigère, efficacité dans la liquéfaction des gaz, réduction des coûts de fonctionnement en améliorant le rendement global du système cryogénique.

Le cycle de Pictet un choix populaire dans des applications nécessitant une production de froid efficace et à faible consommation d'énergie.

On représente ci-dessous le schéma de principe d'un tel cycle fonctionnant avec du propane (fluide frigorigère).

Calculons les paramètres de ce cycle pour une puissance frigorifique $P_F = 1 \text{ kW}$ dans le cas du cycle théorique puis dans le cas du cycle réel.

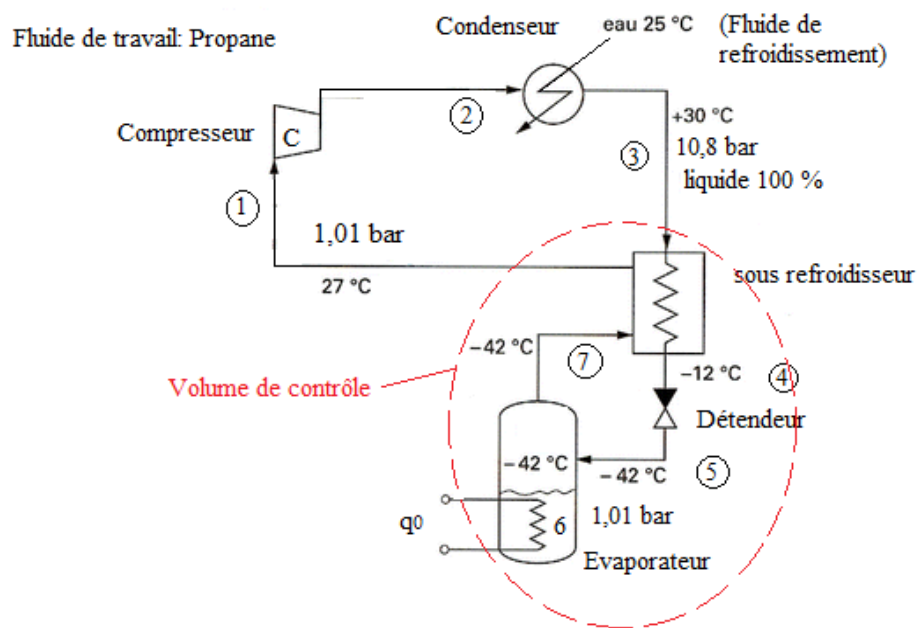


Figure 1.16 : Cycle de Pictet pour le propane à 10,8 bar

Production de froid $q_0 = h_7 - h_5$

On peut aussi calculer q_0 en fonction des états 1 et 3

Appliquons le 1^{er} principe au système dans le volume de contrôle :

$$q_0 + h_3 - h_1 = 0 \implies q_0 = h_1 - h_3 = 24,12 - 8,35 = 15,77 \text{ kJ/mol.}$$

Propriétés thermodynamiques du propane (C_3H_8)

A la saturation

T °C	P bar	h' (liquide) en kJ/mol	h'' (vapeur) en kJ/mol
-42°C	1,01	0	19,23
30	10,8	8,35	-

Vapeur surchauffée

$$P = 1,013 \text{ bar et } t = 27 \text{ °C} \quad h_1 = 24,12 \text{ kJ/mol}$$

$$P = 1,013 \text{ bar et } t = 30 \text{ °C} \quad h = 24,40 \text{ kJ/mol}$$

Liquide sous refroidi

$$P = 10,8 \text{ bar et } t = -12 \text{ °C} \quad h = 3,27 \text{ kJ/mol}$$

$$M = 44 \text{ g/mol.}$$

Débit massique de propane (M_F) dans le compresseur :

$$M_F = \frac{P_F}{q_0} = \frac{10^3}{15,77 \cdot 10^3} = 0,0634 \text{ mol/s} = 0,0027896 \text{ kg/s} = 10,04 \text{ kg/h}$$

Puissance théorique du compresseur (dans l'hypothèse d'un gaz parfait et une compression isotherme)

$$P_C = M_F W_C = M_F R \cdot T_1 \ln \frac{P_2}{P_1} = 0,0634 \cdot 8,314 \cdot 300 \ln \frac{10,8}{1,01} = 374,71 \text{ W}$$

La puissance de compression réelle calculée avec un rendement isotherme $\eta_T = 65 \%$ (par rapport à l'isotherme d'aspiration)

$$P_{C,r} = \frac{P_C}{\eta_T} = \frac{374,71}{0,65} = 576,5 \text{ W}$$

11.4. Exemple de cycle à cascade à 3 étages de température pour la production de froid à -161 °C

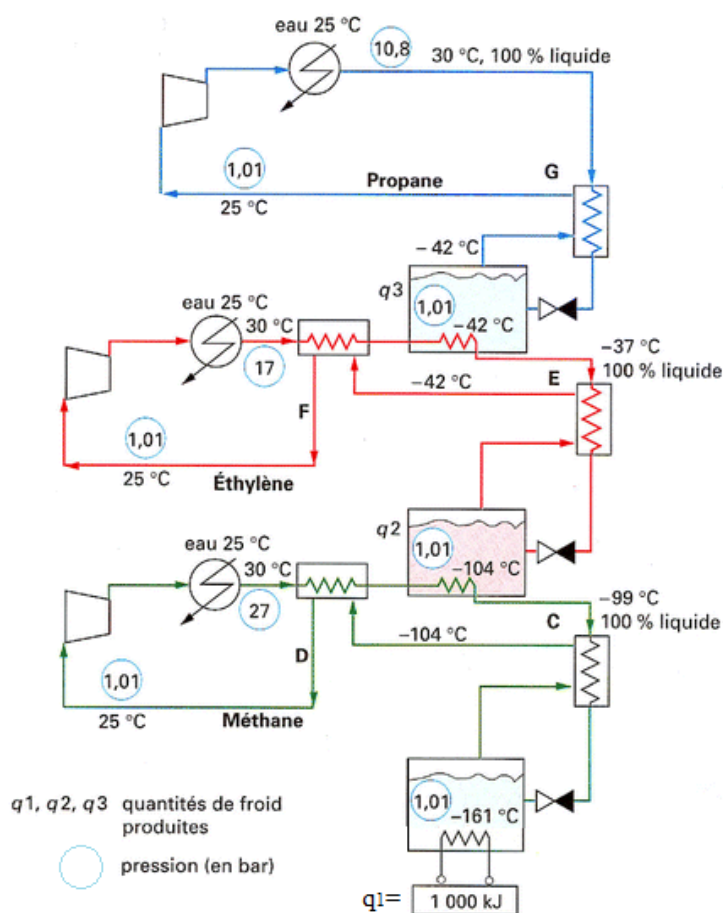


Figure 1.17 : Schéma de principe d'un Cycle « à cascade classique » pour production de froid à -161 °C

Le premier étage est constitué d'un cycle propane qui est comprimé à 10,8 bar afin de pouvoir être condensé à 30 °C dans le réfrigérant à eau (condenseur). Au cours de cette condensation, le propane cède à l'eau une certaine quantité de chaleur.

Ce premier cycle assure le transfert de froid entre la température de l'eau (25 °C) et celle de -42 °C .

Un deuxième cycle, constitué d'éthylène comprimé à 17 bar, assurera le transfert de -42 °C à -104 °C .

Un troisième cycle, constitué de méthane comprimé à 27 bar, assurera le transfert de -104 °C à -161 °C .

12. Définition de la détente

En thermodynamique, la détente désigne la transformation au cours de laquelle un gaz augmente son volume sous l'effet d'un échauffement et/ou d'une baisse de pression. Le contraire de la détente est la compression où le gaz subit une réduction de volume sous l'effet d'une augmentation de pression. Elle peut être isotherme, adiabatique, isentropique ou isenthalpique, selon les conditions spécifiques du processus.

12.1. Détente de joule-Thomson

On considère le dispositif des figures 1.18 utilisé pour la première fois par Joule et Thomson en 1852 pour étudier les gaz réels. Ce dispositif est constitué d'un réservoir de gaz comprimé débrite dans un tube calorifugé, la pression à l'entrée du tube est réglée par une vanne. Le fluide à haute pression traverse un milieu poreux. Par effet de viscosité la pression du fluide diminue pendant que le gaz se déplace vers la deuxième chambre du tube.

12.2. Procédé utilisant la détente isenthalpique (effet Joule- Thomson)

La détente du gaz à travers la vanne est isenthalpique ($h_2 = h_1$).

Pour un **gaz parfait**, la température $T_2 = T_1$: il n'y a ni échauffement ni refroidissement du gaz.

Pour les gaz réels, 2 cas se présentent:

- T_1 est inférieure à la température d'inversion du gaz concerné : alors $T_2 < T_1$ (le gaz se refroidit)
- T_1 est supérieure à la température d'inversion du gaz concerné : alors $T_2 > T_1$ (le gaz se réchauffe)

Pour caractériser l'évolution de la température d'un gaz réel lors d'une détente isenthalpique, on définit le coefficient de Joule –Thomson défini comme le taux de

variation de température par rapport à la variation de pression $\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$

- Si μ_{JT} est négatif, il y a échauffement du gaz
- Si μ_{JT} est positif, il y a refroidissement du gaz
- Si μ_{JT} est nul, il n'y a ni échauffement ni refroidissement

Nb: la température d'inversion dépend de la pression; au point d'inversion pour une pression donnée, la température d'inversion correspond à $\mu_{JT} = 0$

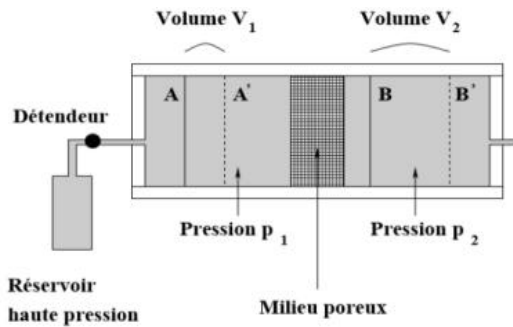


Figure 1.18 : dispositif de détente du gaz

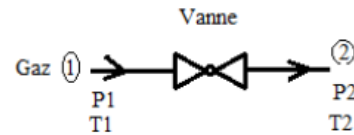


Figure 1.19 : détente d'un gaz à travers une vanne ($p_2 < p_1$)

Le coefficient de Joule-Thomson permet de caractériser l'évolution de la température d'un gaz réel lors d'une détente isenthalpique (enthalpie constante). Sur un diagramme pression-température ($T-p$), on peut tracer des courbes d'enthalpie constante (lignes isenthalpiques). L'analyse de ces courbes permet d'identifier les points de sortie pour différentes conditions d'entrée, en observant notamment si la détente entraîne un refroidissement ou un réchauffement du gaz.

- Si les gaz sont parfaits, dans le diagramme $T-p$, les lignes isenthalpiques sont des droites horizontales du fait de l'unique dépendance de l'enthalpie de la température, en conséquence, lorsque la variation d'enthalpie est nulle, la température doit demeurer constante.
- Pour les gaz réels, comme il est montré sur la figure 1.20, les lignes isenthalpiques sont des courbes qui présentent un maximum. On constate l'apparition de deux régions, dans la première, une diminution de la pression engendre une augmentation de la température, tandis que dans la deuxième région, la détente provoque une diminution de la température. La courbe qui sépare les deux régions est appelé courbe d'inversion du gaz. Le long de cette courbe le coefficient de Joule-Thomson est nul

$$\mu_{JT}$$

Dans la région de diminution de température $\mu_{JT} > 0$ (effet positif). Dans la région de l'augmentation de température $\mu_{JT} < 0$ (effet négatif).

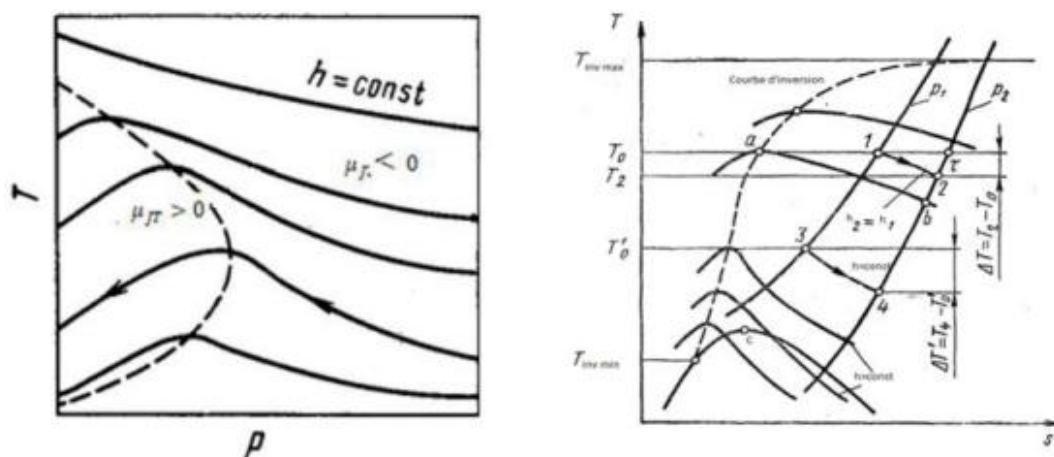


Figure 1.20 : Courbe d'inversion sur le diagramme T-P et sur le diagramme T-s

Conformément à la figure 1.20, il existe une température d'inversion maximale $T_{inv,max}$ au dessus de laquelle l'effet d'étranglement de Joule-Thomson est négatif à toute pression. Il existe également une température d'inversion minimale $T_{inv,min}$ sur la courbe de saturation du liquide.

La température d'inversion maximale ($T_{inv,max}$) de plusieurs gaz est présentée dans le tableau 1.2. On peut classer les gaz en deux catégories selon cette température, première catégorie : gaz dont $T_{inv,max}$ est supérieure à la température ambiante (15°C à 27°C), ce qui inclut la majorité des gaz courants ; deuxième catégorie : gaz dont $T_{inv,max}$ est inférieure à la température ambiante, comme le néon, l'hydrogène et l'hélium.

Cette classification est importante pour choisir le procédé de réfrigération. En effet, pour qu'un gaz puisse être liquéfié par étranglement (effet Joule-Thomson), sa température doit d'abord être abaissée en dessous de sa température d'inversion maximale.

Tableau 1.2 : La température d'inversion maximale de quelques gaz

Gaz	$T_{inv,max}$ (K)	Gaz	$T_{inv,max}$ (K)
Hélium 4	45	Argon	794
Hydrogène	205	Oxygène	761
Néon	250	Méthane	939
Nitrogène	621	Dioxyde de carbone	1500
Air	603	Ammoniac	1994
Monoxyde de carbone	652		

Chapitre 2 : Cycle à gaz (Brayton)

1. Procédé utilisant la détente isentropique (détente avec production de travail)

Pour produire une détente isentropique d'un gaz réel, il faudrait que le gaz se détende de façon adiabatique et en absence de tout frottement. Il faudrait donc que toute l'énergie du gaz se transforme en travail cédé au milieu extérieur. Il est évident qu'à cela, la chute de l'énergie interne du gaz sera à son maximum comparable aux autres procédés de détente aux mêmes conditions initiaux et au même degré de détente. Ainsi, un tel processus est accompagné d'une diminution maximale de température. Le travail produit par la détente du gaz dans ce processus doit être transmis à un dispositif séparé du gaz.

Dans la pratique la détente isentropique est réalisée dans divers moteurs de détente qui sont classés dans deux grandes familles. Moteurs de détente à aubes (turbo-détendeurs) et Moteurs de détente alternatifs (volumétriques)

Le cycle utilisé est le cycle de Brayton inverse (le fluide de travail est un gaz qui ne subit aucun changement de phase)

Le **cycle de Brayton** est un cycle thermodynamique utilisé dans certains moteurs thermiques. Il est notamment utilisé pour les moteurs de turbine à gaz et certains moteurs à réaction. Le cycle consiste à comprimer l'air ambiant, à mélanger l'air avec du carburant, puis à enflammer le mélange, qui se dilate et produit du travail. Dans de nombreux moteurs à cycle de Brayton, l'air chaud peut ensuite être recyclé pour chauffer l'air frais qui arrive. Cela augmente le rendement, car il faut moins de carburant pour chauffer l'air frais. En termes de physique, le cycle consiste en une compression et une expansion adiabatique associée à un chauffage et à un refroidissement isobare, et permet d'augmenter le rendement par rapport à certains autres cycles. Le cycle théorique de Brayton inverse se compose de 4 transformations:

- Compression isentropique 1-2
- Refroidissement isobare 2-3
- Détente isentropique 3-4
- Réchauffement isobare 4-1

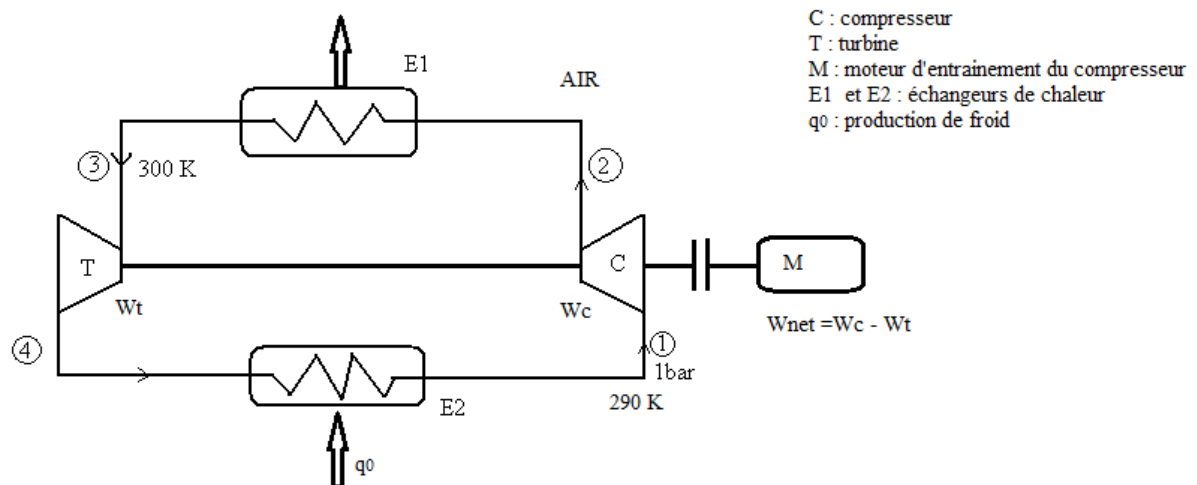


Figure 2.1 Cycle de Brayton inverse avec l'air comme fluide de travail

On supposera que le cycle est parcouru par 1 kg d'air; on donne ci-dessous les relations de calcul utiles connaissant le taux de compression $\tau = \frac{p_2}{p_1}$, les températures T_1 et T_3 et le coefficient adiabatique γ :

$$\text{Température } T_2 \text{ (fin de compression)} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\text{Température } T_4 \text{ (fin de détente)} = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\text{Travail théorique du compresseur : } \mathbf{Wc} = \mathbf{h_2 - h_1} \text{ en kJ/kg}$$

$$\text{Travail théorique de la turbine: } \mathbf{Wt} = \mathbf{h_3 - h_4}$$

$$\text{Travail net fourni au cycle: } \mathbf{Wnet} = \mathbf{Wc - Wt} \quad "$$

$$\text{Production de froid } \mathbf{q_0} = \mathbf{h_1 - h_4} \quad "$$

$$\text{Coefficient de performance } \mathbf{COP} = \frac{\mathbf{q_0}}{\mathbf{Wnet}}$$

$$\mathbf{AN. On donne \quad point 1: \quad T_1 = 290 \text{ K} \quad p_1 = 1 \text{ bar} \quad \quad point 2: \quad p_2 = 6 \text{ bar}}$$

$$\mathbf{Point 3: \quad T_3 = 300 \text{ K} \quad \quad p_3 = 6 \text{ bar} \quad \quad point 4: \quad p_4 = 1 \text{ bar}}$$

$$\gamma = 1,4 \text{ (air)} \quad Cp \text{ (air)} \approx 1,0 \text{ kJ/kg.K}$$

Calculs

$$\tau = \frac{p_2}{p_1} = 6$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 290 (6)^{\frac{0,4}{1,4}} = 477,0 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 300 \left(\frac{1}{6} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} = 179,8 \text{ K soit } -93 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{Wc} = \mathbf{h_2 - h_1} = Cp(T_2 - T_1) = 1,0 (477,0 - 290) = 187,0 \text{ kJ/kg}$$

Chapitre 2 : Cycle à gaz (Brayton)

$$\mathbf{W_t = h_3 - h_4 = C_p(T_3 - T_4) = 1,0 (300 - 179,8) = 120,2 \text{ kJ/kg}}$$

$$\mathbf{W_{net} = 187,0 - 120,2 = 66,8 \text{ kJ/kg}}$$

$$\mathbf{q_0 = h_1 - h_4 = C_p(T_1 - T_4) = 1,0 (290 - 179,8) = 110,2 \text{ kJ/kg}}$$

$$\mathbf{COP = \frac{q_0}{W_{net}} = \frac{110,2}{66,8} \approx 1,65}$$

Chapitre 3 : Cycle de Rankine (cycle à changement de phase)

1. Définition

Le **cycle de Rankine** ou **cycle de vapeur de Rankine** est le processus largement utilisé par les centrales électriques telles que les centrales à charbon ou les réacteurs nucléaires. Dans ce mécanisme, un combustible est utilisé pour produire de la chaleur à l'intérieur d'une chaudière, transformant l'eau en vapeur qui se détend ensuite à travers une turbine produisant un travail utile. Ce procédé a été mis au point en 1859 par l'ingénieur écossais William J.M. Rankine. Il s'agit d'un cycle thermodynamique qui convertit la chaleur en énergie mécanique qui est généralement transformée en électricité par production d'électricité.

Le cycle de Rankine est un cycle à changement de phase qui se rapproche au cycle de Carnot. Il se distingue par deux isobares et deux isothermes.

2. Différence avec le cycle de Carnot

Le cycle de Carnot est un cycle idéal réversible. Les phases de compression, de détente et de condensation sont trop délicates d'un point de vue technique. La notion de réversibilité (des transferts de chaleur et de travail) exige des surfaces d'échanges grandes et des transformations trop lentes qui ne sont pas réalisables en pratique. Le cycle de Rankine, physiquement réalisable, est le cycle thermodynamique qui se rapproche le plus du cycle de Carnot.

Dans le cycle de Rankine, la condensation est totale. La compression qui suit nécessite un travail faible car le fluide est sous forme liquide qui nécessite qu'une pompe, peu consommatrice d'énergie. Cependant, son rendement est inférieur à celui du cycle de Carnot.

3. Etude des cycles de turbine à vapeur à compression et détente

Soit une machine à vapeur modélisée sur la figure 3.1.

L'eau subit des transformations avec les deux sources de chaleur. Ces échanges provoquent des transitions de phase entre liquide et vapeur. Le cycle comprend deux isobares et deux adiabatiques.

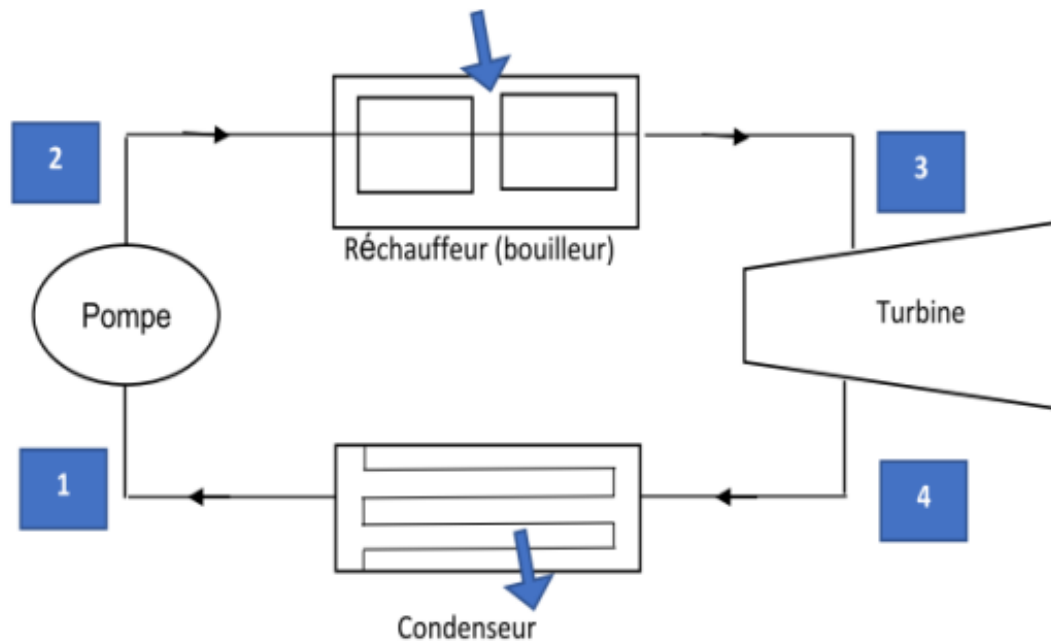


Figure 3.1 Cycle de Rankine

4. Bilan Energétique

Pour chaque composant du cycle, la variation d'enthalpie par unité de masse:

$$\Delta h = Q + W$$

Pour la Pompe : $h_2 - h_1 = W_P$

Bouilleur : $h_3 - h_2 = Q_2$

Turbine : $h_4 - h_3 = W_T$

Condenseur : $h_1 - h_4 = Q_1$

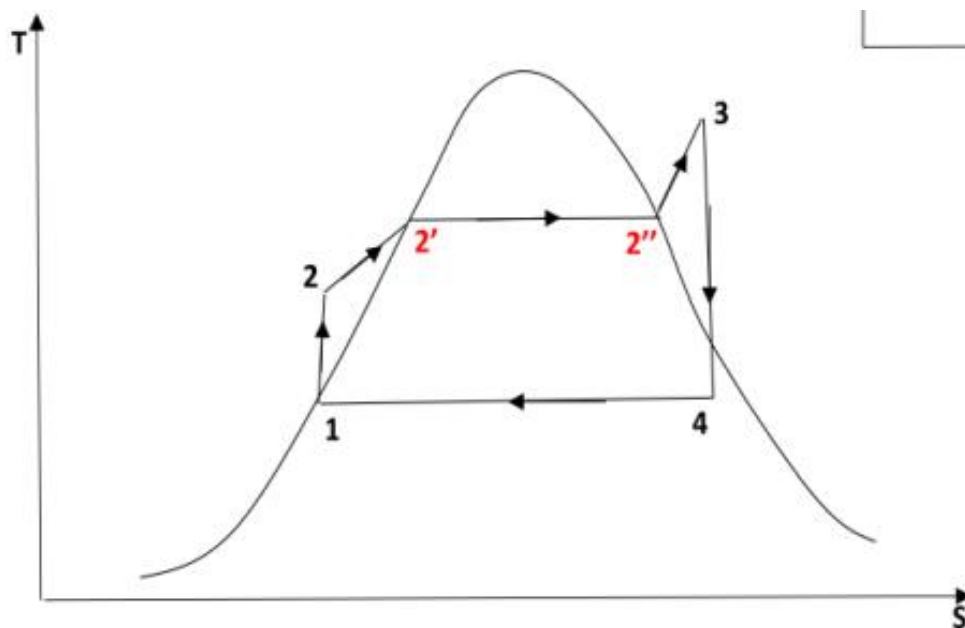


Figure 3.2 Cycle théorique sur le diagramme entropique.

Chapitre 3 : Cycle de Rankine

1-2, Compression adiabatique réversible (isentropique) dans la pompe.

2-3, Chauffage à pression constante (isobare) qui est une vaporisation dans le réchauffeur.

3-4, Détente adiabatique (isentropique) dans la turbine.

4-1. Refroidissement à pression constante (isobare) liquéfaction dans le condenseur.

Le recours aux tables et diagrammes thermodynamiques est nécessaire pour le calcul des états intermédiaires $2'$ et $2''$.

Le rendement global du cycle de Rankine dépend de la différence de température entre la source chaude (le générateur de vapeur) et la source froide (le condenseur). Plus cette différence est grande, plus le rendement du cycle est élevé. Cependant, il existe des limites physiques et économiques à l'augmentation de cette différence de température.

Chapitre 4 : liquéfaction du gaz naturel et travail minimum

1. Historique de la liquéfaction du gaz naturel

Joule tentait, avec la détente de Joule-Gay Lussac, de refroidir les gaz, pour but ultime de les liquéfier. La méthode s'avéra peu efficace : l'effet était trop faible. William Thomson (lord Kelvin) proposa à Joule de modifier son système de détente pour lui permettre de fonctionner en régime permanent ; il devenait possible de réinjecter en amont de l'appareil le gaz issu de l'une des détente, pour lui en faire subir une autre et cumuler ainsi les effets.

Le procédé a initialement été développé aux États-Unis dans les années 1910. À l'époque, l'objectif principal était la séparation de l'hélium contenu naturellement dans le gaz naturel. Un premier brevet sur le transport par barge fut déposé dès 1914, mais ne fut pas suivi d'application industrielle. En 1941, une première usine commerciale de liquéfaction de gaz naturel ouvrit à Cleveland. Elle servait au stockage temporaire du gaz, pour lisser la consommation sur le réseau.

Le transport maritime du gaz naturel liquéfié commença à titre expérimental en 1959. Le *Methane Pioneer* était un Liberty ship reconverti, un type de navire disponible en grand nombre après la Seconde Guerre mondiale et souvent utilisé comme base pour divers projets innovants. En 1959, il réalisa le tout premier transport maritime de gaz naturel liquéfié (GNL), reliant Lake Charles, en Louisiane, à Canvey Island, au Royaume-Uni. Ce succès ouvrit la voie au développement du commerce international du GNL. En 1964, l'Algérie inaugura le premier terminal d'exportation commercial à Arzew, d'où elle expédia du gaz vers la Grande-Bretagne, puis vers la France et les États-Unis. En 1969, les premières exportations de GNL d'Alaska vers le Japon, au départ de Kenai, marquèrent l'entrée de l'Asie dans ce marché en pleine expansion. Depuis lors, le commerce mondial du GNL n'a cessé de croître, accompagné d'une diversification progressive des pays fournisseurs et des marchés consommateurs, faisant du GNL un pilier central de la transition énergétique mondiale.

2. Définition

Le GNL (gaz naturel liquéfié) désigne le gaz naturel transformé sous forme liquide. Cet état est atteint lorsque le gaz est refroidi à une température d'environ -160°C à pression atmosphérique. Après traitement, la liquéfaction permet de condenser le gaz naturel en GNL en réduisant son volume d'un facteur de près de 600 pour un même

pouvoir calorifique, ce qui facilite son transport par voie maritime. Le GNL est essentiellement constitué de méthane (à plus de 90%). C'est un liquide inodore, sans couleur, non corrosif et non toxique.

3. Fonctionnement technique

Une « chaîne GNL » est mise en place lorsque la construction d'un gazoduc n'est pas envisageable, le plus souvent en raison de coûts de construction trop élevés, de la distance de transport, d'une étape maritime imposée ou de contraintes géopolitiques. Plusieurs grandes étapes constituent cette chaîne GNL, de la liquéfaction du gaz naturel jusqu'à la regazéification pour fournir le gaz au consommateur final.

4. Liquéfaction du gaz naturel

Le gaz naturel est d'abord acheminé par gazoduc, du gisement où il a été extrait jusqu'à une usine de liquéfaction disposant d'une façade maritime et d'installations portuaires.

Dans l'unité de liquéfaction, le gaz naturel subit plusieurs traitements successifs :

- **épuration** : elle consiste à extraire le dioxyde de carbone (CO_2) du gaz naturel car il peut endommager les unités de liquéfaction en s'y solidifiant, ainsi que le sulfure d'hydrogène (H_2S) et d'autres composés soufrés ;
- **déshydratation** : on élimine l'eau (H_2O) du gaz pour éviter la formation d'hydrates de méthane qui peuvent bloquer les échangeurs cryogéniques. Une fois « sec », le gaz naturel est quasiment du méthane pur. On le débarrasse également de toute trace de mercure (Hg), élément toxique qui peut corroder les alliages utilisés dans la suite du processus ;
- **prérefroidissement** : le gaz naturel est refroidi à une température proche de -30°C . Une série de distillations (dans les colonnes d'épuration) permet d'isoler les hydrocarbures plus lourds ainsi que les GPL (gaz de pétrole liquéfié : propane et butane). Ceux-ci peuvent être vendus comme matière première dans la pétrochimie ou comme carburant ;
- **liquéfaction** : le gaz est liquéfié par un procédé utilisant des cycles à cascade classique ou incorporée et sort à près de -160°C , entièrement liquide à pression atmosphérique ;

Le processus de liquéfaction consomme une importante quantité d'énergie : l'usine de liquéfaction utilise en moyenne près de 10% du gaz qui lui est livré pour son propre fonctionnement, en particulier pour alimenter ses pompes à chaleur.

- **Stockage du GNL**

Avant chargement, le GNL est stocké à pression atmosphérique dans de grands réservoirs cylindriques verticaux à proximité de l'usine de liquéfaction. Ceux-ci fonctionnent comme des bouteilles thermos. Métalliques ou en béton, ils possèdent une double paroi et une isolation thermique sophistiquée afin de maintenir le gaz à l'état liquide (à -160°C) avec un minimum d'évaporation.

Pour rappel, près de 600 m^3 de gaz naturel occupent seulement 1 m^3 à l'état liquide (à pression atmosphérique). Les réservoirs de GNL, qui disposent d'une capacité de stockage comprise entre 65 000 et 150 000 m^3 de GNL permettent donc de stocker de très grandes quantités d'énergie.

- **Transport du GNL jusqu'au terminal méthanier**

Le GNL est chargé à bord de méthaniers, des navires géants spécialement conçus pour cet usage. Les méthaniers doivent également être isolés thermiquement pour maintenir le gaz à l'état liquide en minimisant les déperditions énergétiques : leurs réservoirs sont dits « adiabatiques », c'est-à-dire sans pertes thermiques.

Les plus gros méthaniers en activité peuvent transporter près de 267 000 m^3 de GNL.. Pendant la traversée, le méthane qui s'évapore des cuves « adiabatiques » est récupéré pour participer à la propulsion du navire.

Une fois à destination, les méthaniers déchargent leur cargaison sur un terminal doté d'une installation de réception et de stockage cryogénique du GNL dans des réservoirs similaires à ceux utilisés sur les sites de liquéfaction.

- **Regazéification**

Lorsque la consommation le nécessite, le GNL est regazéifié : sa température est portée d'environ -160°C à plus de 0°C sous haute pression (entre 60 et 100 bars). Le GNL peut être réchauffé par des échangeurs à ruissellement d'eau de mer ou par combustion d'une partie du gaz.

Avant l'acheminement du gaz par gazoduc depuis le terminal jusqu'aux réseaux de distribution, son pouvoir calorifique peut être ajusté par modification de la teneur en azote ou par mélange avec d'autres gaz.

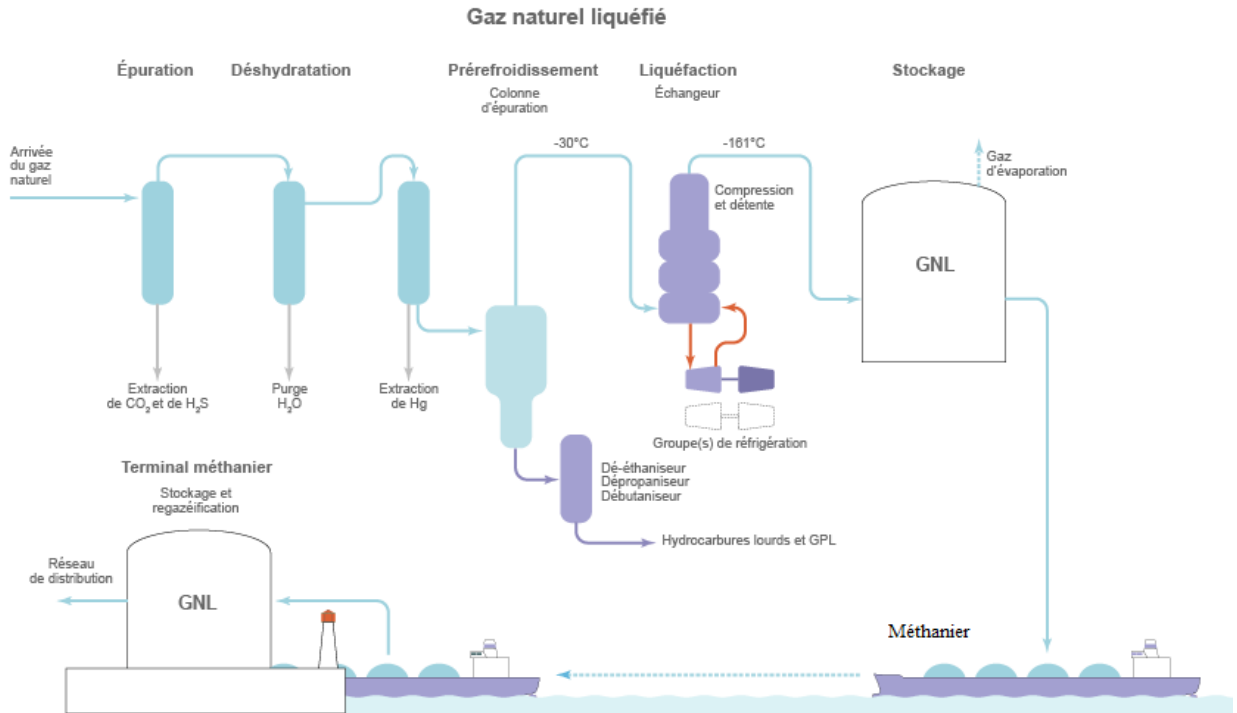


Figure 4.1 : Différentes étapes de la « chaîne GNL »

(www.connaissancedesenergies.org)

5. Travail minimum de liquéfaction

Pour comparer et améliorer les composants des liquéfacteurs et les cycles de liquéfaction, il faut être capable de mesurer l'efficacité des processus. La performance des systèmes peut être quantifiée avec trois paramètres différents ; ce sont

- le travail $(-\dot{W})$ requis pour liquéfier un gaz par rapport au débit de gaz comprimé $(\dot{m}_g)$: $-\dot{W} / \dot{m}_g$
- le travail requis par rapport à la quantité de gaz qui est liquéfiée $(\dot{m}_L)$: $-\dot{W} / \dot{m}_L$
- la fraction du débit total de gaz qui est liquéfiée : $y = -\dot{m}_L / \dot{m}_g$

Une amélioration de la performance du liquéfacteur est donc associée à la réduction du travail requis ou à une augmentation de la fraction du débit du gaz liquéfié.

Souvent le cycle de réfrigération réel est comparé avec le cycle thermodynamique idéal (Figure). Dans ce processus, le gaz est comprimé d'une manière réversible et isotherme de la température ambiante (point 1) à une haute pression (point 2) pour assurer que le gaz deviendra un liquide saturé après une expansion réversible et isentropique (point o). La pression finale au point o est égale à la pression au point 1.

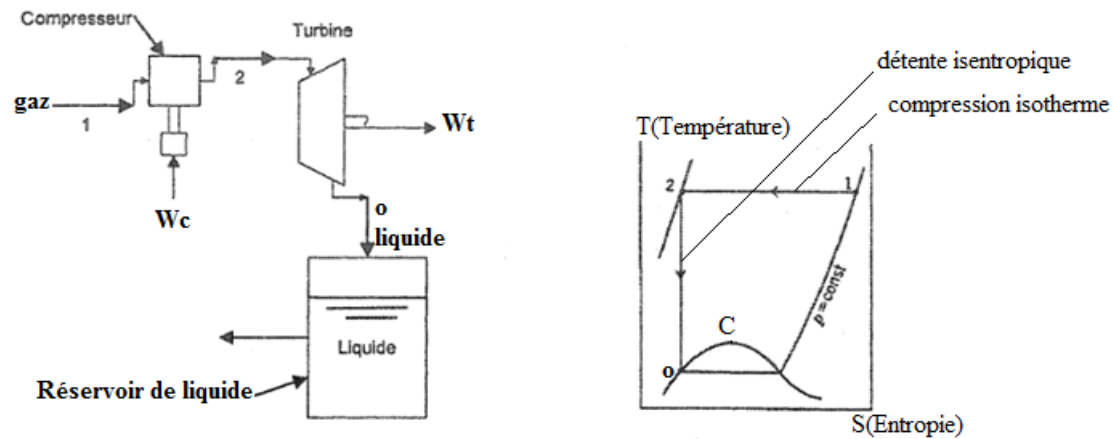


Figure 4.2 : Cycle idéal de liquéfaction

La consommation d'énergie de chaque système réel est comparée au minimum d'énergie théorique requis pour liquéfier un gaz selon le cycle idéal de liquéfaction.

Le travail minimum ($W_{\min}$) requis pour la liquéfaction d'un kg de gaz est donné par la relation :

$$W_{\min} = T_1 (s_1 - s_o) - (h_1 - h_o) \text{ en kJ /kg de gaz liquéfié}$$

T_1 = température initiale du gaz

s_1 et h_1 : entropie et enthalpie du gaz à l'état initial

s_o et h_o : entropie et enthalpie du gaz liquéfié et saturé à la pression atmosphérique

Chapitre 5 : Cycles réels de liquéfaction

1. Cycles à cascade classique et à cascade incorporée

Les deux cycles sont utilisés essentiellement dans les unités de liquéfaction du gaz naturel.

1.1. Cycle cryogénique à cascade classique

Le procédé est celui mis en œuvre à Arzew (Oran) dans trois unités de $0,5 \times 10^9$ Nm³/an (mètre cube normal/an) de la CAMEL (Compagnie Algérienne de Méthane Liquéfié), mises en service en 1963. Donnée sur le croquis ci-dessous.

Il s'agit d'une cascade classique à aspiration froide, fonctionnant avec 3 étages au propane, 4 étages à l'éthylène et 3 étages au méthane. Le transfert de froid se fait par étapes successives à des températures progressivement décroissantes

C'est un procédé à CASCADE qui à plusieurs étages on utilise dans le premier l'ammoniac (NH₃) comme premier fluide qui sera comprimé jusqu'à 5 atm et liquéfier par détente isenthalpique son évaporation inférieure à la pression atmosphérique permet d'atteindre 215 K (-30 °C).

Le deuxième étage c'est un cycle à éthylène (C₂H₄) la température 230 K permet de liquéfier l'éthylène à son évaporation après détente abaisse la température à 173 K (-100 °C).

Le troisième étage c'est un cycle à méthane (CH₄) qui sera liquéfier à 230 K est après détente sa température atteint 112K.

Le quatrième étage est un étage d'azote qui sera liquéfier par le méthane à 112 K sous pression d'une dizaine d'atmosphère après détente l'évaporation de l'azote liquide permet d'atteindre une température 63 K. Son rendement thermodynamique est le rapport entre l'efficacité du système sur l'efficacité de Carnot

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_C}, \quad \varepsilon = \frac{Q_2}{W}, \quad \varepsilon_C = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

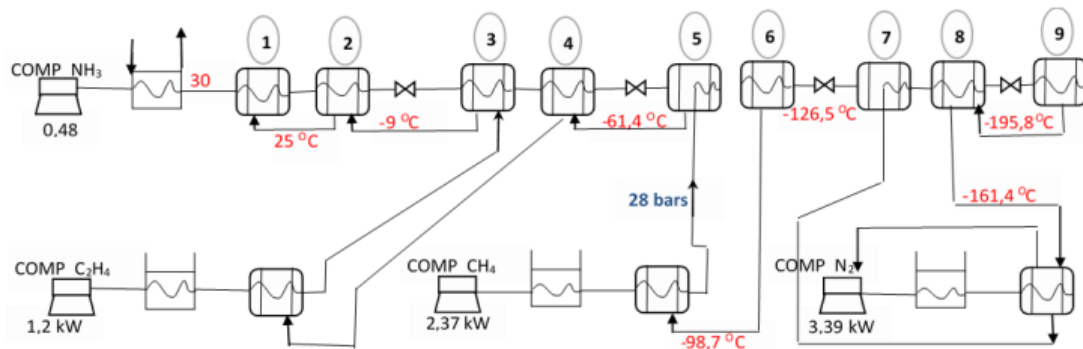


Figure 5.1 : Schéma du procédé de liquéfaction à cascade classique

- Exemple de cycles à cascade à 3 étages de température pour la liquéfaction du gaz naturel

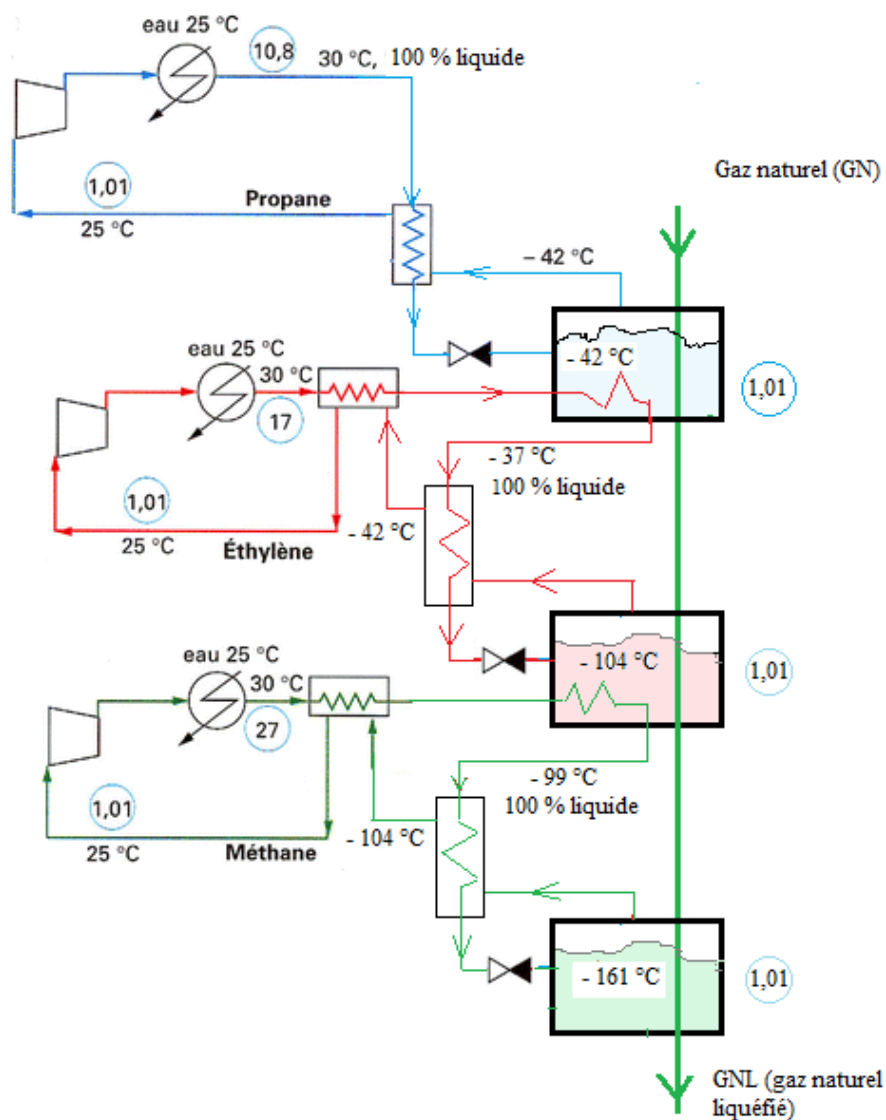


Figure 5.2 : Cycles à cascade classique pour la liquéfaction du gaz naturel

1.2. Cycle à cascade incorporée de liquéfaction du GN

Il s'agit également d'un cycle à cascade, mais reposant sur un fluide frigorigène unique, constitué d'un mélange soigneusement formulé de certains composants du gaz naturel. Ce mélange est conçu de manière à couvrir une large plage de températures d'évaporation et de condensation, tout en maintenant, à quelques pertes de charge près, des pressions quasiment constantes tout au long du cycle.

La composition du mélange est spécifiquement ajustée pour que la quantité de fluide condensée dans une zone de température donnée – correspondant à un étage du cycle – puisse, lors de sa vaporisation dans l'étage suivant, fournir exactement la quantité de froid nécessaire à ce dernier. Ce principe permet une répartition fine et continue du froid à travers les différentes étapes du procédé, optimisant ainsi l'efficacité globale du système.

- Description du schéma de base

Le gaz de cycle, constitué d'un mélange d'azote, de méthane, d'éthane, de propane, de butane et de pentane (figure 5.3), est comprimé en C à 32 bar, puis refroidi et partiellement condensé dans le réfrigérant R à eau de mer. Les phases sont séparées en S1.

La phase liquide est sous-refroidie dans l'échangeur E1 jusqu'à -60°C , puis détendue dans une vanne à la pression de 2,7 bar. Sa vaporisation dans l'échangeur E1, facilitée par la présence des vapeurs plus légères provenant de l'échangeur E2, fournit le froid nécessaire : à son propre sous-refroidissement ; au pré refroidissement du gaz naturel à -60°C ; à une deuxième condensation partielle du fluide frigorigène, figurant ainsi la source chaude de l'étage suivant de la cascade.

Le fluide totalement vaporisé en fin de réchauffement est renvoyé à l'aspiration du compresseur.

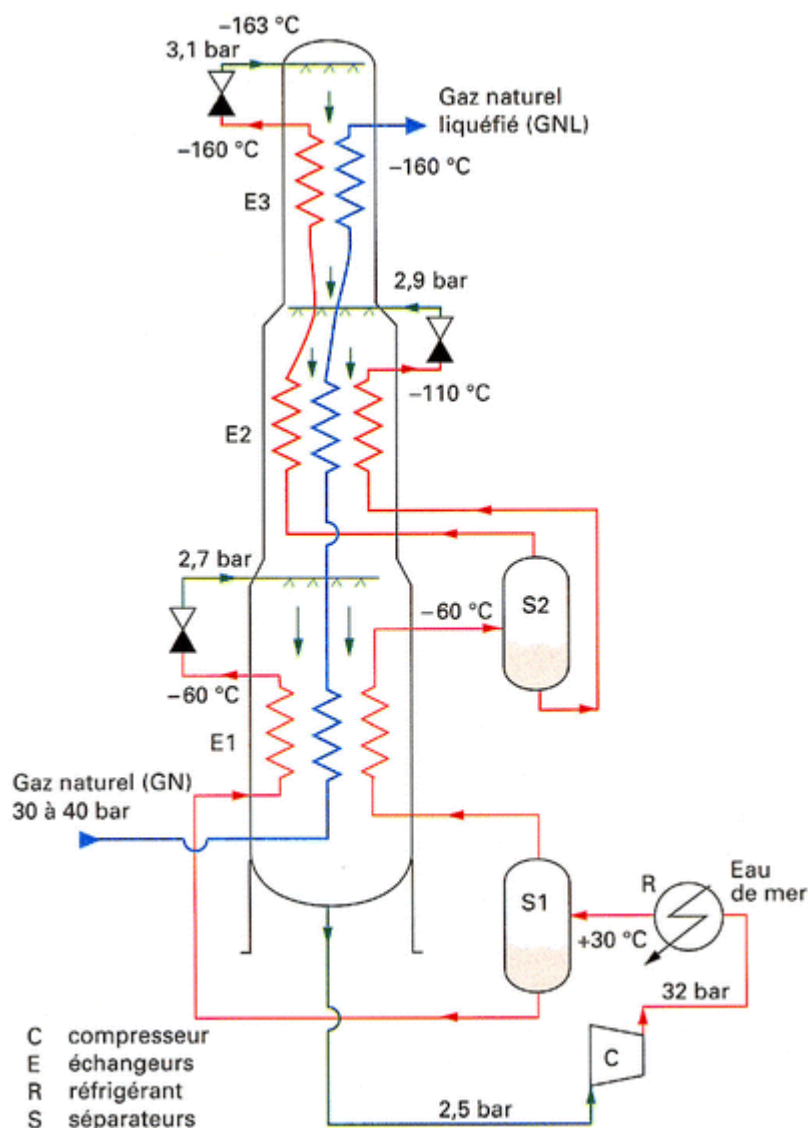


Figure 5.3 : Cycle à « cascade incorporée » (L'Air Liquide) appelé aussi MRC (Air Products) et ARC (Technip)

La phase vapeur du séparateur S1, qui a été à son tour partiellement condensée par refroidissement à -60 °C dans l'échangeur E2, arrive au séparateur S2 où l'on obtient deux phases. On procède alors comme en sortie de S1. Le liquide issu de S2 est sous-refroidi à -110 °C et détendu à 2,9 bar pour être vaporisé à son tour dans l'échangeur E2.

On procède ainsi successivement d'étage en étage jusqu'à ce que la température requise soit atteinte. Le schéma décrit comporte trois étages : le dernier est réalisé entre l'échangeur E2 dans lequel la condensation du cycle s'achève et l'échangeur E3 dans lequel le dernier condensat est vaporisé.

Chapitre 5 : Cycles réels de liquéfaction

Le gaz naturel est généralement introduit dans l'échangeur sous une pression de 30 à 40 bar, sa liquéfaction se fait pour l'essentiel entre -70 et -110 °C ; il est ensuite sous-refroidi, au moins partiellement, jusqu'à -140 °C, voire jusqu'à -160 °C.

Chapitre 6 :Principales méthodes industrielles d'obtention des basses températures

1. Cycle de Linde

Le cycle de Linde est un procédé thermodynamique utilisé pour la liquéfaction des gaz, en particulier l'air, l'azote, ou l'oxygène. Il a été mis au point par l'ingénieur allemand Carl von Linde à la fin du 19e siècle. Ce cycle repose sur le refroidissement par détente du gaz, combiné à un échange thermique progressif dans un circuit en recyclage. Le cycle de Linde utilise la détente isenthalpique (ou effet J-T) pour la production de très basses températures pour la réfrigération ou la liquéfaction des gaz

1.1. Cycle de réfrigération

La figure 6.1 représente le cycle de Linde avec l'azote à 200 bar fonctionnant en réfrigération pour l'obtention d'une température de 77 K (-196 °C)

NB: la température d'ébullition de l'azote à la pression de 1 bar est d'environ -196 °C

Le cycle est parcouru par 1 kg d'azote

Pour le cycle théorique, on supposera:

- La compression est isotherme (compresseur refroidi)
- $T_2 = T_1$
- Pertes de chaleur et pertes de pression négligeables

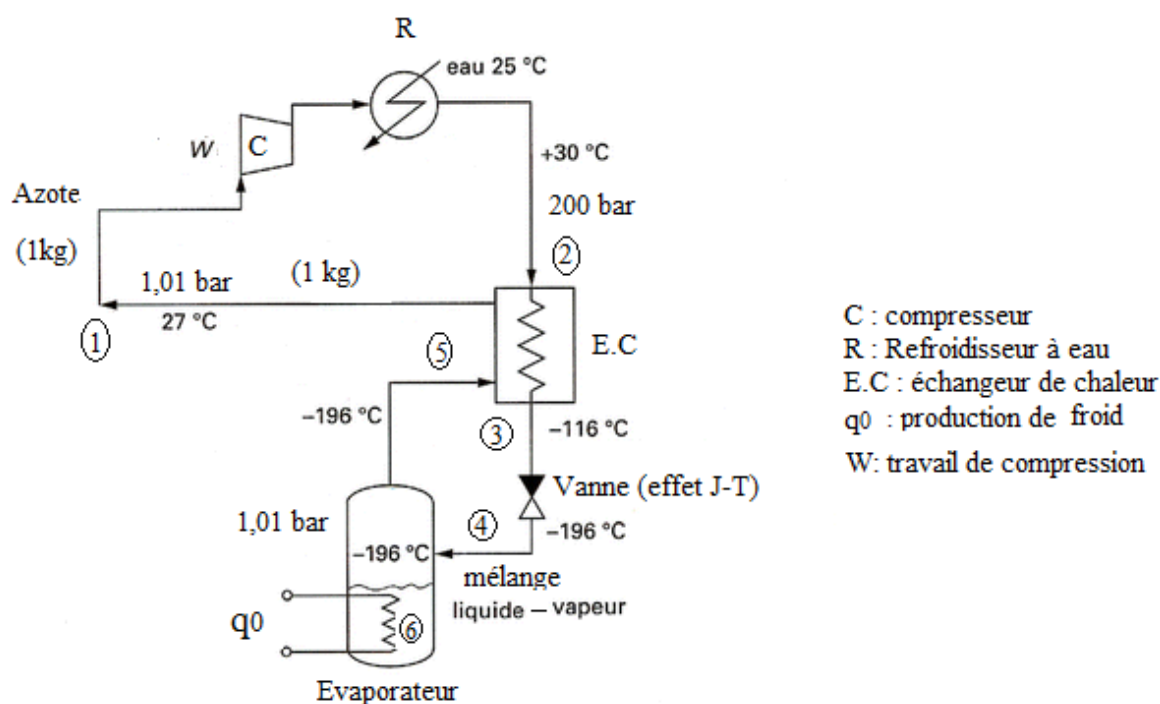


Figure 6.1 : Cycle de Linde (ou cycle de Joule-Thomson) avec l'azote à 200 bar

- **Production de froid $q_0 = h_1 - h_2 (= h_5 - h_4)$ en J/kg si h en J/kg**

q_0 ne dépend que des paramètres du compresseur (enthalpies entrée et sortie du compresseur)

-**Travail de compression isotherme $w = rT_1 \ln \frac{P_2}{P_1}$ en J/kg**

avec r constante de l'azote (296,9 J/kg.K)

-**Bilan thermique de l'échangeur (E.C): $h_2 - h_3 = h_1 - h_5$**

Coefficient de performance : **$COP = \frac{q_0}{w}$**

1.2. Cycle de Liquéfaction

La figure 6.2 représente le cycle de Linde pour la liquéfaction de l'azote

Travail de compression isotherme $w = rT_1 \ln \frac{P_2}{P_1}$ en J/kg

avec r constante de l'azote (296,9 J/kg.K)

Bilan thermique de l'échangeur (E.C): $h_2 - h_3 = (h_1 - h_5) (1-y)$

Avec y = fraction d'azote liquide produite

Fraction d'azote liquide produite (théoriquement):

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_6} \quad \text{Avec}$$

h_1 : enthalpie "entrée compresseur"

h_2 : enthalpie "sortie compresseur"

h_6 : enthalpie de l'azote liquide sous 1,01 bar

NB: les enthalpies peuvent être évaluées à partir de diagrammes ou de tables thermodynamiques relatifs à chaque gaz

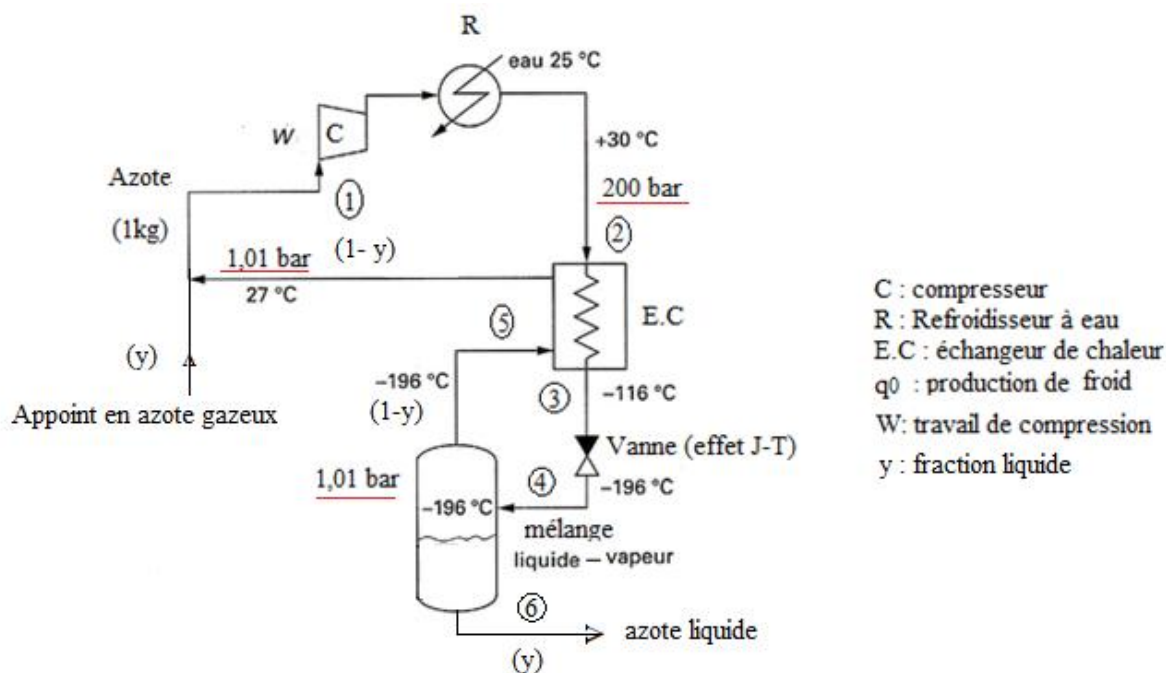


Figure 6.2 : Cycle de Linde de liquéfaction de l'azote

2. Comparaison entre la détente isenthalpique et la détente isentropique

Détente isenthalpique	Détente isentropique
Il existe une condition de T_{inv}	Il n'existe aucune condition
Il ne produit aucun travail. Il s'agit d'un processus avec travail interne	Il produit du travail. Il s'agit d'un processus avec travail externe
Le dispositif est simple en construction	Le dispositif comporte des mécanismes complexes
Utilisé pour un changement de phase en fluides	Utilisé pour les fluides monophasés
Inconvénient : Le bouchage de la construction	Une maintenance régulière et des vérifications périodiques sont nécessaires

3. Procédé associant détente isenthalpique (effet J-T) et détente isentropique: (Cycle de Claude _Heylandt ou Kapitza)

3.1. Cycle de Claude

Le cycle de Claude est une amélioration du cycle de Linde pour la liquéfaction des gaz, en particulier l'air, l'azote ou l'oxygène. Développé par l'ingénieur français Georges Claude au début du 20e siècle, ce cycle introduit une détente avec production de travail (turbine) pour augmenter l'efficacité du refroidissement.

Le cycle de Claude associe deux détentes, une isenthalpique et l'autre isentropique. Après une compression isotherme, le gaz est refroidi dans un premier échangeur (2-3). A la sortie de l'échangeur, une fraction de gaz haute pression refroidi (point 3) est envoyée dans la turbine servant à détendre isentropique d'un grand pourcentage du gaz pressurisé. Ce gaz, maintenant à très basse température (point 7), est dévié vers le deuxième échangeur de chaleur en (point 7), ou rejoint la ligne montante des gaz frais (refus de liquéfaction) pour pré-refroidir le gaz à haute pression. Un schéma du cycle Claude est présenté dans la figure 6.3.

L'utilisation de ce cycle est assez répandue dans les unités de séparation d'air et dans beaucoup d'appareils traitant divers gaz pour leur séparation ou pour leur liquéfaction.

-Taux de liquéfaction

$$y = \frac{q_{mf}}{q_m} = \left[\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \right] + x \left[\frac{h_3 - h_f}{h_1 - h_f} \right]$$

$x = \frac{q_{me}}{q_m}$ le rapport de débit massique de la fraction de gaz détendue
dans la turbine au débit massique total du gaz

-Le travail mécanique dépensé par Kg de gaz comprimé

$$\frac{-\dot{W}_c}{q_m} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] - [x(h_1 - h_e)]$$

-Le travail mécanique dépensé par Kg de gaz liquéfié

$$\frac{-\dot{W}_c}{q_{mf}} = \frac{-\dot{W}_c}{y q_m} = \frac{1}{y} \{ [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] - [x(h_3 - h_e)] \}$$

L'état d'entrée du compresseur est pris à 25 ° C et 1 atm pour les deux cycles mais la pression de sortie du compresseur est pris 40 atm pour le cycle Claude et 7 atm pour le cycle Kapitza. Les détendeurs sont supposés être isentropiques.

- Le système est à l'état d'équilibre. Tous les processus sont des processus de débit constant.
- Négliger les effets de l'énergie cinétique et potentielle dans l'analyse de tous les composants du système.
- Équilibre de la masse et pas de chaleur en fuite dans le système



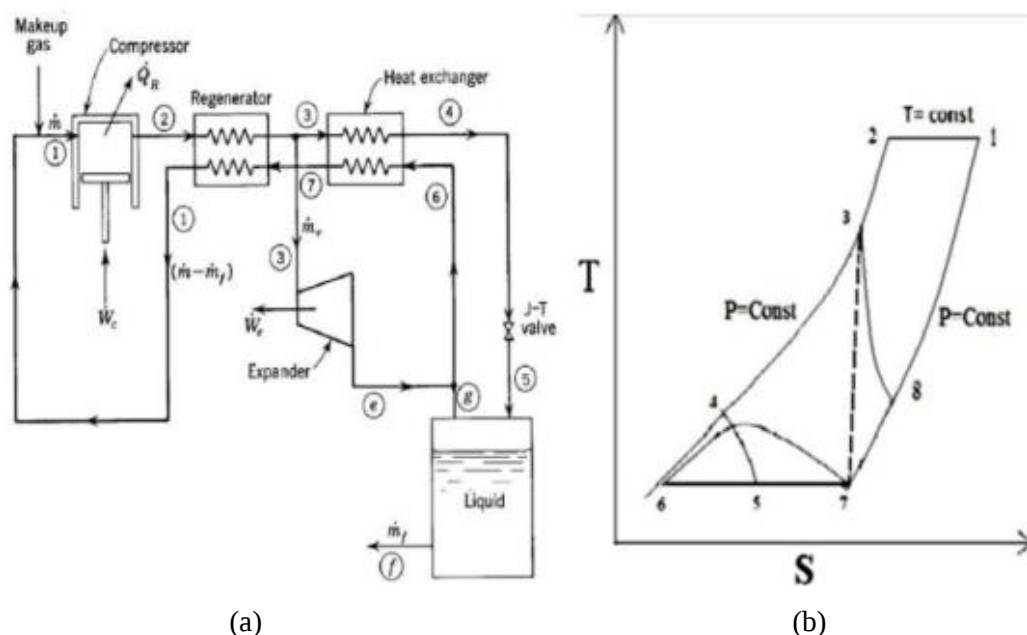


Figure 6.4 : Cycle de Kapitza (a) représentation schématique (b) Diagramme T-s

3.3. Cycle de Heylandt

Le cycle Heylandt développée pour optimiser le rendement énergétique lors de la liquéfaction de gaz comme. Il a été proposé par l'ingénieur allemand Hans Heylandt dans les années 1930–1940, est une autre version modifiée du cycle Claude dans laquelle le premier changeur de chaleur à basse température (BT) est éliminé du système et par le recours à la compression du gaz à haute pression (HP). La Figure 6.5 présente le cycle Heylandt.

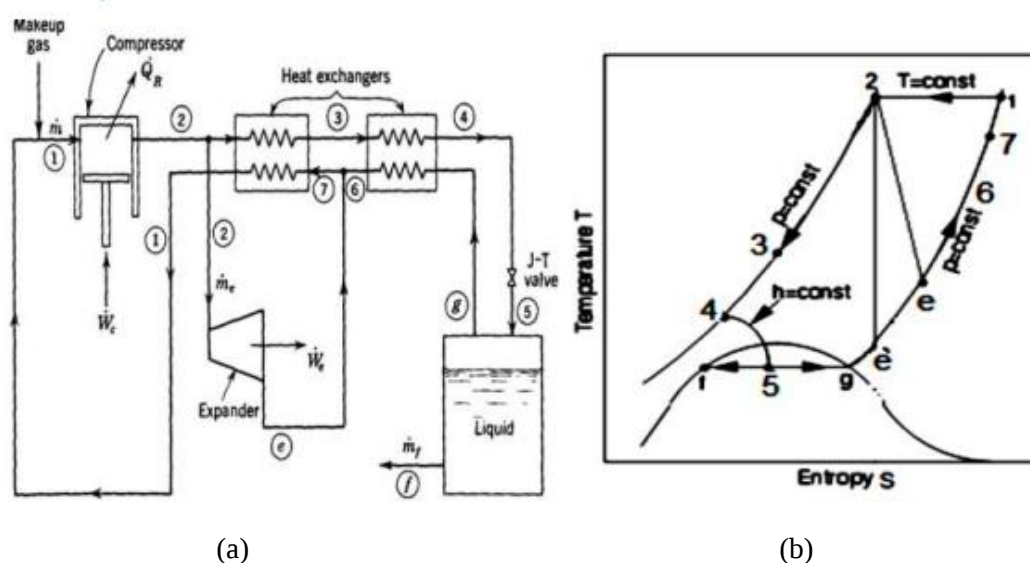


Figure 6.5 : Cycle de Heylandt (a) représentation schématique (b) Diagramme T-s

4. Application à la production de froid

Prenons l'exemple d'un cycle de Claude produisant du froid à -196 °C (température de l'azote liquide) de moyenne pression

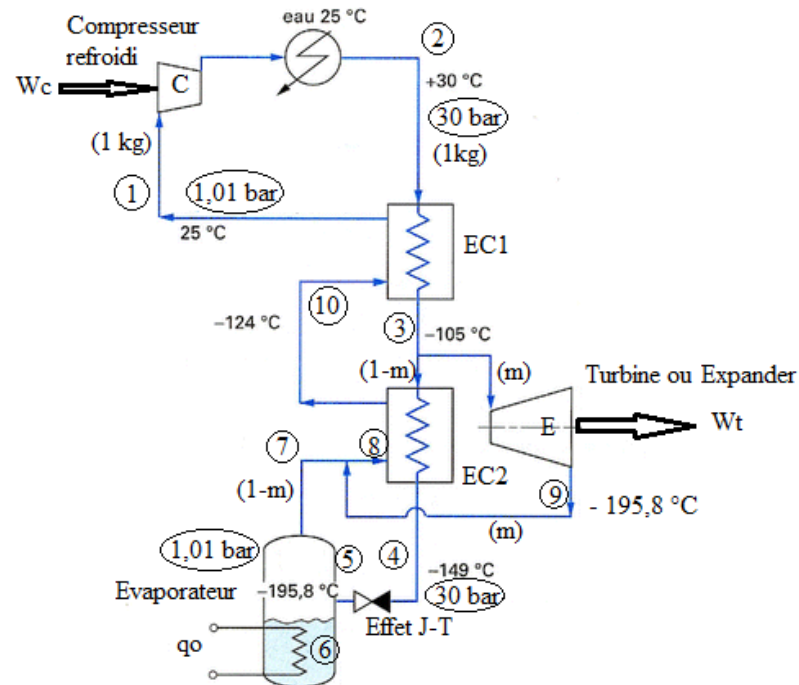


Figure 6.6 : Cycle de Claude avec de l'azote à 30 bar

EC1 et EC2 : Echangeurs de chaleur

W_c : travail de compression isotherme $W_c = rT_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$ en kJ/kg

W_t : travail de détente isentropique: $W_t = m(h_3 - h_9)$ en kJ/kg d'azote aspiré

q_o : production de froid : $q_o = (h_1 - h_2) + m(h_3 - h_9)$ en kJ/kg

m: fraction de débit traversant la turbine ou expander

5. Application à la liquéfaction

Prenons l'exemple d'un cycle de Claude MP assurant la liquéfaction de l'azote.

Azote liquide sous 1,01 bar et à -196 °C

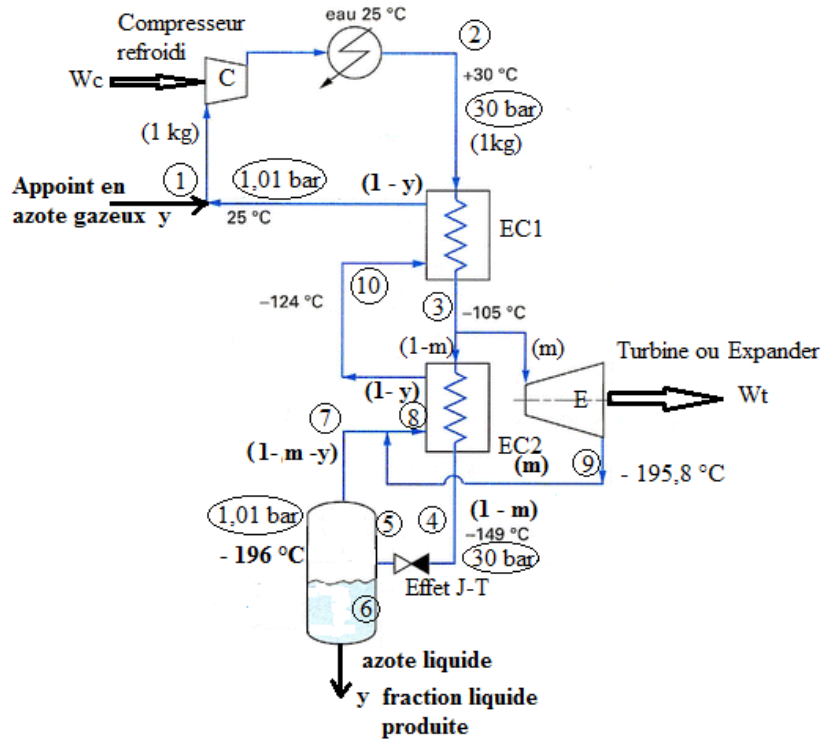


Figure 6.7 : Cycle de Claude

La fraction d'azote liquide y produite dans ce cycle de Claude:

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_6} + m \frac{h_3 - h_9}{h_1 - h_6}$$

6. Cycle de Claude MP (30 bar) sur le diagramme entropique

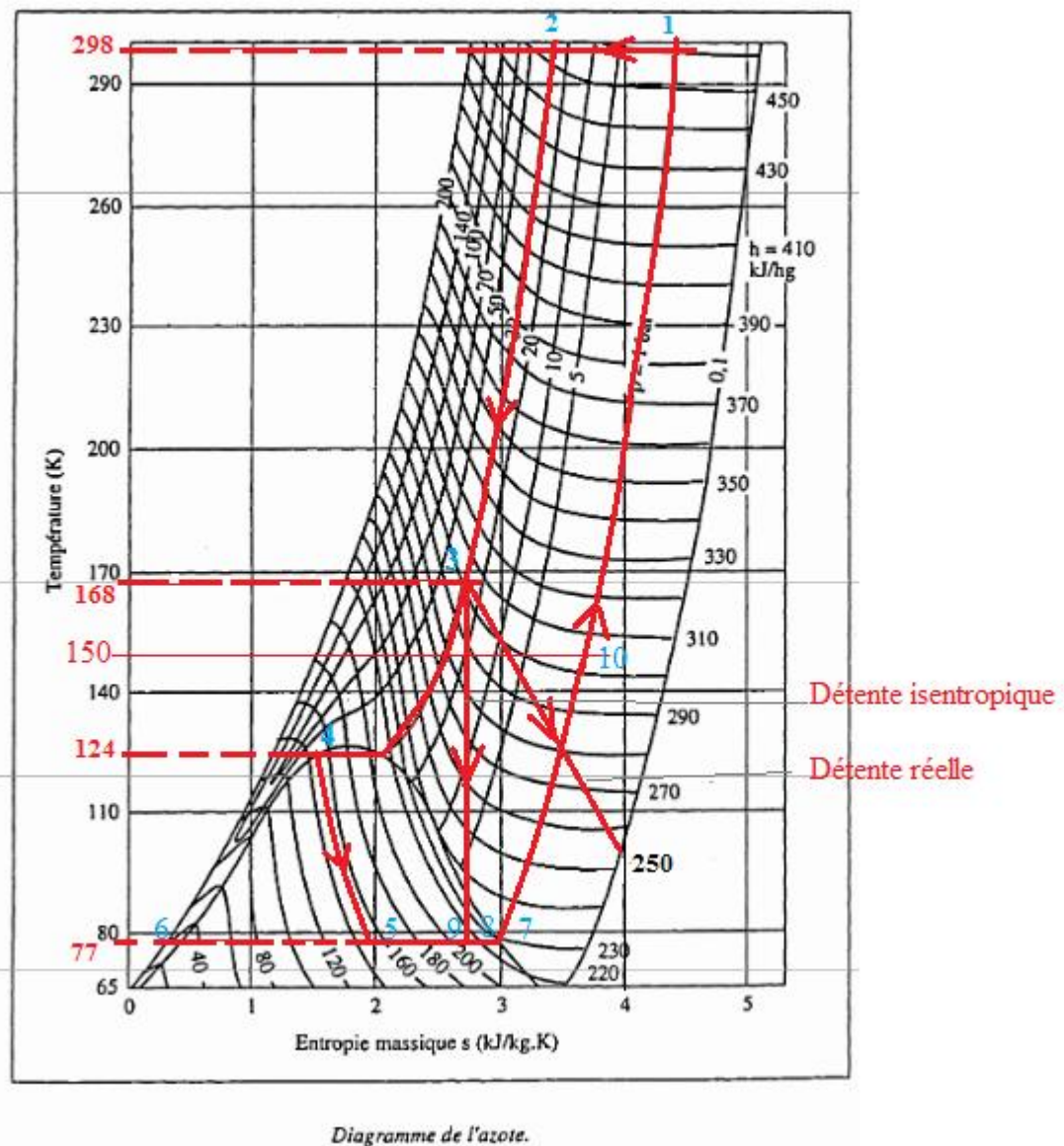


Figure 6.8: Cycle de Claude MP (30 bar) sur le diagramme entropique

Exercice 1

Considérons un système de **réfrigération en cascade à deux étages** fonctionnant entre les limites de pression de 0,8 et 0,14MPa. Chaque étape fonctionne sur un cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal avec le **réfrigérant -134a** comme fluide de travail. Le rejet de chaleur du cycle inférieur vers le cycle supérieur a lieu dans un échangeur de chaleur adiabatique à contre-courant où les deux flux entrent à environ 0,32MPa.

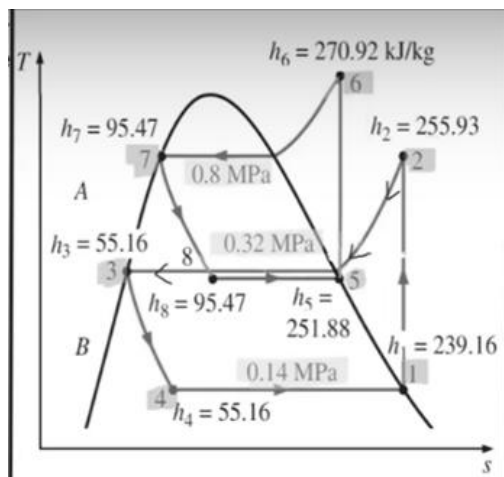
Si $\dot{m}_a = 0,05 \text{ kg/s}$, déterminer :

- 1-Le débit massique du réfrigérant dans le cycle inférieur $\dot{m}_b$
- 2-Le taux d'évacuation de la chaleur de l'espace réfrigéré, Q_L .
- 3- La puissance absorbée par le compresseur, $W_{in,net}$
- 4- Le coefficient de performance de ce réfrigérateur en cascade

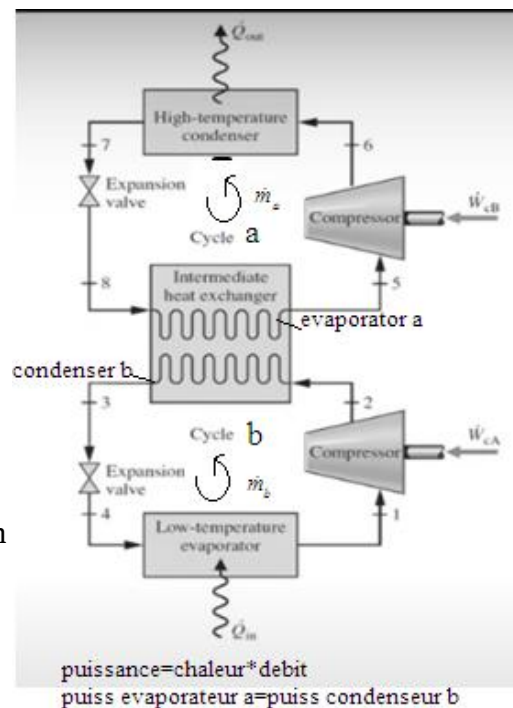
On a du diagramme : $h_1=239.16 \text{ kJ/kg}$, $h_2=255.93$, $h_3=55.16$, $h_4=55.16$,

$h_5=251.88$

$h_6=270.92$, $h_7=95.47$, $h_8=95.47$



Compressor : compresseur, evaporator : évaporateur. Heat exchanger : échangeur, expansion valve : détendeur



Solution :

1. Le débit massique du réfrigérant dans le cycle inférieur $\dot{m}_b$

$$\begin{aligned}\dot{m}_a(h_5 - h_8) &= \dot{m}_b(h_2 - h_3) \\ 0.05(251.88 - 95.47) &= \dot{m}_b(255.93 - 55.16) \\ \Rightarrow \dot{m}_b &= 0.0390 \text{ kg / s}\end{aligned}$$

2. Le taux d'évacuation de la chaleur de l'espace réfrigéré, Q_L .

$$\begin{aligned}Q_L &= \dot{m}_b(h_1 - h_4) \\ 0.0390(239.16 - 55.16) \\ \Rightarrow Q_L &= 7.18 \text{ KW}\end{aligned}$$

3. La puissance absorbée par le compresseur, $W_{in,net}$

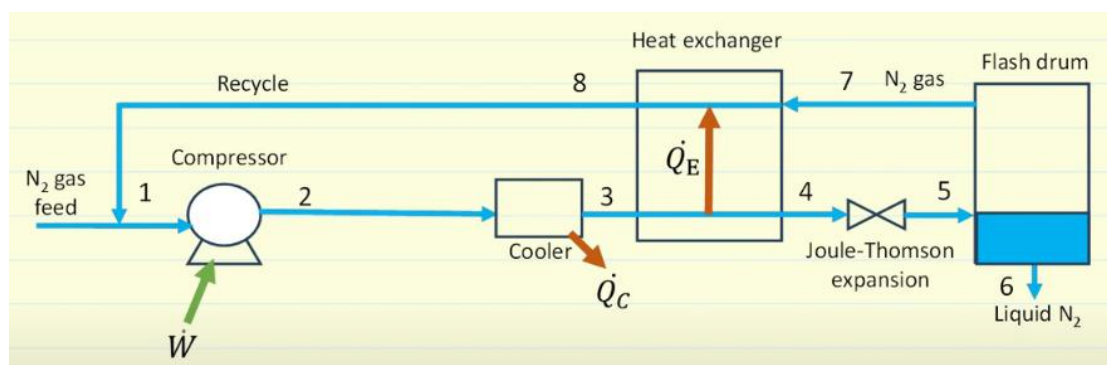
$$\begin{aligned}W_{in,net} &= \dot{W}_{comp,a} + \dot{W}_{comp,b} \\ &= \dot{m}_a(h_6 - h_5) = \dot{m}_b(h_2 - h_1) \\ 0.05(270.92 - 251.88) + 0.0390(255.93 - 239.16) \\ \Rightarrow W_{in,net} &= 1.61 \text{ KW}\end{aligned}$$

4. Le coefficient de performance de ce réfrigérateur en cascade

$$COP = \frac{Q_L}{W_{in,net}} = \frac{7.18}{1.61} = 4.46$$

Exercice 2 :

Déterminer ce qui suit pour un système Linde-Hampson avec de l'azote comme fluide de travail lorsque le système fonctionne entre 1,013 bar (1 atm) et 202,6 bar (200 atm) à 300 K. L'efficacité de HX est de 100%.



1. Le travail idéal
2. Fraction liquide
3. Travail / unité de masse comprimée
4. Travail / unité de masse liquéfiée
5. Performance du système. On a du diagramme :

$$T_1 = 300^\circ\text{K},$$

Exercices

$$p_1=1,013 \text{ bar}, h_1=28 \text{ kJ/kg}, s_1=0,27 \text{ kJ/kg.K}$$

$$p_2=202,6 \text{ bar}, h_2=-5 \text{ kJ/kg}, s_2=1,38 \text{ kJ/kg.K}$$

$$p_6=1,013 \text{ bar}, T_6=-196^\circ\text{C}, h_6=-399 \text{ kJ/kg},$$

$$s_6=-3,64 \text{ kJ/kg}$$

Solution

in: m_1 ; $-W_c$

out: m_2 ; $-Q_R$

1er principe de la thermodynamique: $E_{in}=E_{out}$

$$\dot{m}h_1 - W_c = \dot{m}h_2 - Q_R$$

$$Q_R - W_c = \dot{m}(h_2 - h_1) \dots (1)$$

En utilisant la 2eme loi de thermodynamique:

$$Q_R = \dot{m}(s_2 - s_1) \dots (2)$$

En combinant (1) et (2) :

$$\begin{aligned} \frac{-W_c}{\dot{m}} &= T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) \\ &= 300(0.27 + 1.38) - (30 + 5) = 460 \text{ KJ/kg} \end{aligned}$$

. La fraction massique du liquide : $pt_f = pt_6$

$$y = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_6}$$

$$T_f = -196^\circ\text{C} = 79.15^\circ\text{K}$$

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_6} = \frac{28 + 5}{399 + 30} = 0.076$$

W_c par unité de masse liquéfiée :

$$\frac{-W_c}{\dot{m}_f} = \frac{-W_c}{\dot{m}y} = \frac{460}{0.076} = 6052,63 \text{ KJ/kg}$$

Exercice 3

On considère une centrale thermique à vapeur fonctionnant avec le cycle de Rankine. La vapeur saturée entre dans la turbine à la pression 80bar et le liquide saturé sort du condenseur à la pression 0.08 bar. La puissance nette développée par le cycle est de l'ordre de 100MW. Déterminer :

- 1- Le rendement thermique et le débit de la vapeur en kg/h

Exercices

- 2- La puissance théorique de la turbine en MW
- 3- La puissance calorifique délivrée par la chaudière en MW
- 4- La puissance de refroidissement au niveau du condenseur
- 5- Le débit de l'eau de refroidissement au niveau du condenseur en kg/h, sachant que sa température d'entrée égale à 17°C et celle de la sortie est de 40°C.

Cycle dans le diagramme (s,T)

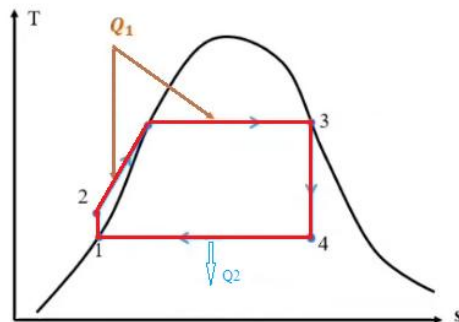
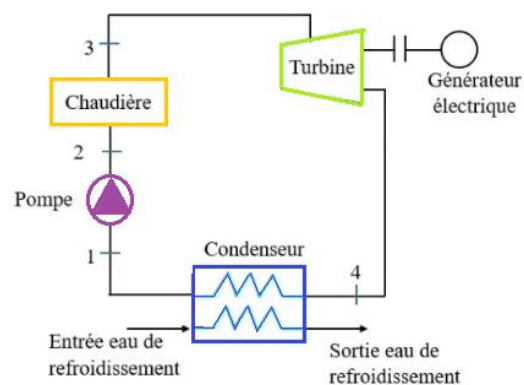


Schéma d'installation



Solution

- 1- le rendement thermique et le débit de la vapeur en kg/h

- point 1 (liquide saturé à $p_1=0.08\text{bar}$) : (tableau A-3)

$$h_1 = 173.88 \text{ kJ / kg}, \quad v_1 = 1.0084 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{kg}$$

- point 2 (liquide): $p_2=p_3=80\text{bar}$

$$h_2 = h_1 + v_1 \cdot (p_2 - p_1) \quad \text{ou} \quad h_2 = h_1 + 100 \cdot v_1 \cdot (p_2 - p_1)$$

$$h_2 = 173.88 + 100 \cdot 1.0084 \cdot 10^{-3} (80 - 0.08)$$

$$= 181.94 \text{ kJ / kg}$$

- point 3 (vapeur saturée à $p_3=80\text{bar}$)
- $h_3 = 2758 \text{ kJ / kg}, \quad s_3 = 5.7432 \text{ kJ / kg}$

- point 4 (mélange liquide vapeur) $p_4=p_1=0.08\text{bar}$

$$x_4 = \frac{h_4 - h_{4f}}{h_{4g} - h_{4f}} = \frac{s_4 - s_{4f}}{s_{4g} - s_{4f}} = \frac{s_3 - s_{3f}}{s_{4g} - s_{4f}}$$

$$= \frac{5.7432 - 0.5927}{8.2287 - 0.5927} = 0.674 \quad \text{f : liquide, g : gaz}$$

$$s_4 = s_3$$

Exercices

$$h_{4f}=h_1=173.88\text{kJ /kg}$$

$$h_{4g}=2577\text{kJ/kg}$$

$$s_{4f}=0.5927\text{kJ/kgK}, s_{4g}=8.2287\text{kJ/kgK}$$

$$h_4 = h_{4f} + x_4(h_{4g} - h_{4f})$$

$$h_4 = 173.88 + 0.674(2577 - 173.88)$$

$$= 1793.58\text{kJ / kg}$$

- rendement du cycle:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{1793 - 173.88}{2758 - 181.94}$$

$$= 0.3712 = 37.12\%$$

- le debit de la vapeur en kg/h

$$W_{cycle} = W_{net} = |W_d - W_c|$$

$$= (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

$$\text{soit } P_{net} = q_{mv} W_{net} = q_{mv} [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)]$$

-  d : détente, c : compression

debit massique vapeur

$$\Rightarrow q_{mv} = \frac{P_{net}}{[(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)]}$$

$$q_{mv} = \frac{100 * 10^3}{[(2758 - 1793.58) - (181.94 - 173.88)]}$$
$$= 104.56\text{kg / s} = 104.56 * 3600 = 3.76 * 10^5\text{kg / h}$$

- 2- puissance théorique de la turbine (MW)

$$P_{th,turbine} = q_{mv} (h_4 - h_3) = 104,56(1793.58 - 2758) * 10^{-3}$$
$$= -100.84\text{MW}$$

- 3- puissance calorifique par la chaudiere (MW)

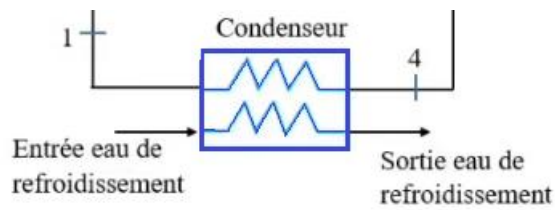
$$\dot{Q}_1 = q_{mv} (h_3 - h_2) = 104.56(2758 - 181.94)$$
$$= 269353\text{kW} = 269.353\text{MW}$$

- 4- puissance de refroidissement condenseur

$$\dot{Q}_2 = q_{mv} (h_1 - h_4) = 104,56(173.88 - 1793.58) * 10^{-3}$$
$$= -169.35\text{MW}$$

Exercices

5- le débit de l'eau de refroidissement au niveau du condenseur en kg/h



conservation de la puissance thermique échangée :

$$q_{mv}(h_1 - h_4) + q_{me}(h_s - h_e) = 0$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_2 + q_{me}(h_s - h_e)$$

$$\Rightarrow q_{me} = \frac{-\dot{Q}_2}{h_s - h_e}$$

s : sortie, e:entrée

du tableau A-2 :

à $T_e = 17^\circ\text{C}$, $h_e = 71.38 \text{ kJ/kg}$

$T_s = 35^\circ\text{C}$, $h_s = 167.57 \text{ kJ/kg}$

$$q_{me} = \frac{169.35 \cdot 10^{-3}}{167.57 - 71.38} \cdot 3600$$

$$\Rightarrow q_{me} = 6.338 \cdot 10^6 \text{ kg / h}$$

Références bibliographique

- R.B.Scott, ‘‘cryogenic engineering’’, van Nostrand, Princeton, 1959.
- R.R. Conte, ‘‘Eléments de cryogenie’’, Masson,Paris,1970
- G.G.Haselden, ‘‘Cryogenic Fundamentals’’,Academic press, London,1971
- R.A.Barron, ‘‘Cryogenics system’’, Oxford University Press, New York, 1985
- B.A.Hands, ‘‘Cryogenic engineering’’, Academic Press, London, 1986
- K.D.Timmerhaus and T.M Flynn, ‘‘Cryogenic process engineering’’, plenum Press, New York, 1989
- Liquéfaction du gaz naturel, par Pierre PETIT. Techniques de l’Ingénieur, traité Génie des procédés J 3600
- Séparation et liquéfaction des gaz, par Pierre PETIT. Techniques de l’Ingénieur, traité Génie des procédés J 3601
- Cours-exo_Instal-Energ-2_k.Nehal
- Cours Cryogénie de HAMDY Messaoud 2023
- Cours de Cryogénie de Slimane Benferhat: Unité : UED 3.2 Université Ibn Khaldoun –Tiaret-, 2020
- A. Elaziouti, PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ PERMANENTS, USTO-MB- Faculté de Chimie 2020
- cours de cryogénie Dr.-Ing R. Laouar, Département de Génie Mécanique Université Larbi Tebessi Tébessa, 2017
- D. Quattrochi, "Brayton Cycle," 06 August 2006. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/16.unified/>