

USTO-MB- Faculté de Chimie - Département de Génie des Matériaux
L3-Génie des procédés
Module : Procédés cryogéniques

CHAPITRE III

PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ PERMANENTS

Table des matières

Table des matières.....	1
III-1- Introduction.....	2
III-2- La liquéfaction.....	2
III-3- Cycle de Linde (Cycle idéal de liquéfaction).....	3
III-4- Détente de Joule-Thomson (Joule-Kelvin).....	4
III-5- Cycle de Linde –Hampson.....	7
III-8- Cycle de Claude.....	9
III-9- Cycle de KAPITZA.....	10
III-10- Cycle de Heylandt.....	11
III-12- Références bibliographiques.....	13

III-1- Introduction

- Les basses températures ont contribué à de nombreux développements scientifiques comme par exemple la découverte de la supraconductivité en 1911.
- Aujourd'hui, de nombreuses applications industrielles utilisent les basses températures : l'agroalimentaire, la médecine avec l'imagerie médicale, le spatial ou encore les applications à haut champ magnétique (accélérateur de particules, réacteurs de fusion).

III-2- La liquéfaction

- La liquéfaction consiste à lui retirer de l'énergie afin de le refroidir de puis la température ambiante jusqu'à son point de rosée, puis à condenser la vapeur saturée.
- Le processus de liquéfaction assure que le liquide produit est pur et, en conséquence, n'a pas besoin d'être purifié davantage par la suite.

Il existe plusieurs techniques de production des basses températures, et parmi ces techniques :

- 1- Cycle idéal de liquéfaction (Cycle de Linde),
- 2- Détente de Joule-Thomson (Joule-Kelvin),
- 3- Cycle réel de liquéfaction (Cycle de Linde –Hampson),
- 4- Cycle de Claude,
- 5- Cycle de Kapitza,
- 6- Cycle de Heylandt,

Pour refroidir un fluide cryogénique, on lui applique une série de transformations thermodynamiques. Les principales transformations utilisées sont :

- Transférer de la chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid via un échangeur de chaleur.
- Pomper sur un bain liquide en équilibre avec sa vapeur. Cela a pour effet d'abaisser la pression du fluide et donc la température en suivant la ligne de saturation gaz/liquide.
- Effectuer une détente isenthalpique, souvent appelée détente Joule Thomson ($\Delta H = 0$). Cela consiste à détendre le gaz à travers un orifice. Si cette détente s'effectue au-dessous de la température d'inversion, elle s'accompagne d'un refroidissement du gaz (la température d'inversion de l'hélium est d'environ 40K).
- Extraire de la chaleur via un travail extérieur sur une turbine ou un piston (transformation isentropique $\Delta S = 0$).

III-3- Cycle de Linde (Cycle idéal de liquéfaction),

Le cycle idéal de liquéfaction correspond à celui mis en jeu dans un processus idéal, composé des transformations (**Figure III-1**):

- 1-2** : Une compression réversible et isotherme du gaz de la température ambiante (**point 1**) à une haute pression (**point 2**) pour assurer que le gaz deviendra un liquide saturé,
- 2-f** : Une détente réversible et isentropique jusqu'au **point f**. La pression finale au **point f** est égale à la pression au **point 1**.

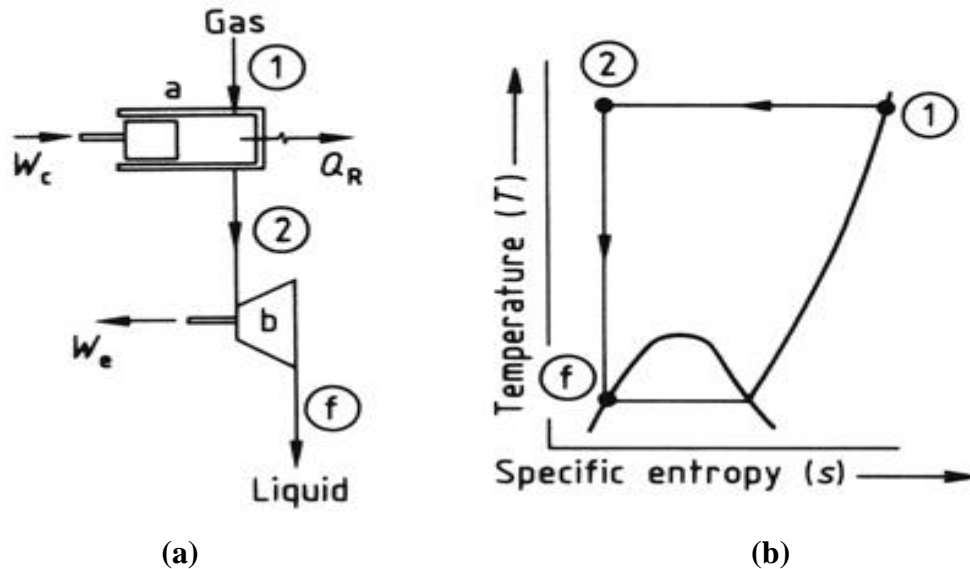


Fig. III-1 Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz (a) Représentation schématisée (b) Diagramme T-s

❖ Paramètres de performance pour le système de liquéfaction de gaz

La performance des systèmes peut être quantifiée avec trois paramètres différents; ce sont :

- Le travail requis pour liquéfier un gaz par rapport au débit de gaz comprimé : \dot{W}_C/q_m ,
- Le travail requis par rapport au débit de gaz t liquéfiée : $-\dot{W}_C/q_{mf}$,
- La fraction du débit total de gaz liquéfiée: $y=q_{mf}/q_m$,

$$-\dot{W}_C/q_m = y (-\dot{W}_C/q_{mf})$$

- **Figure of merit (FOM)** $FOM = \dot{W}/\dot{W}_{id} = (-\dot{W}_C/q_{mf}) = y (-\dot{W}_{C,id}/q_{mf})$

Dans le system idéal, la totalité du gaz comprimé est liquéfié, et que $q_m = q_{mf}$ ou $y=100\%$

❖ Le travail théorique (mécanique) dépensé

Le minimum travail théorique nécessaire pour liquéfier un gaz est exprimé par :

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{q}_{mf}} = T_1(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f) \quad \dots(1)$$

- Avec $-\frac{\dot{W}_c}{\dot{q}_{mf}}$ le travail requis pour une unité de masse de gaz liquéfié en (KJ/kg),
- s_1 l'entropie spécifique du gaz à l'entrée du cycle en (KJ/kg °C),
- s_f l'entropie spécifique du gaz liquéfié à la sortie du cycle en (KJ/kg °C),
- h_1 l'enthalpie spécifique du gaz à l'entrée du cycle en (KJ/kg),
- h_f l'enthalpie spécifique du gaz liquéfié à la sortie du cycle en (KJ/kg),
- $\dot{q}_{m,f}$ le débit massique du gaz liquéfié à la sortie du cycle en (kg/s)

❖ Efficacité du cycle

Ce minimum d'énergie requis est converti en une efficacité qui correspond uniquement aux températures initiales et finales du processus. Le rendement maximal d'une machine thermique est donc décrit par l'équation de Carnot:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_1 - T_f}{T_1} \quad \dots(2)$$

- Où η_{carnot} l'efficacité du cycle Carnot en (%),
- T_1 la température absolue du gaz à l'état initiale (la température ambiante) en K
- T_f la température absolue du gaz à l'état finale (température de liquéfaction) en K

III-4- Détente de Joule-Thomson (Joule-Kelvin)

- L'effet Joule-Thomson $J-T$ est le terme utilisé pour désigner la chute de température d'un gaz comprimé causée par une expansion libre.
- Celle-ci se définit par un gaz de haute pression qui passe à travers un étranglement important (bouchon poreux, verre fritté, coton tassé, robinet à pointeau, ...).
- Le phénomène $J-T$ est irréversible puisque le système n'est pas à l'équilibre.

La **figure III-2** ci-dessous présente un exemple d'une expansion $J-T$.

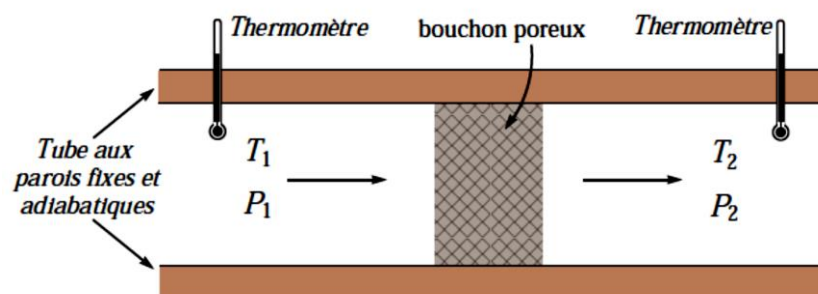


Fig.III-2 Expérience de Joule-Thomson

❖ Description de l'expérience

- Dans ce système, la membrane qui sépare les deux sections, une remplie de gaz et l'autre vide, est rompue pour laisser le gaz passer de la zone de haute pression à la zone de basse pression.
- Les parois du tuyau sont rigides et adiabatiques.
- La pression P_1 en amont du tampon est plus forte que la pression P_2 en aval (cette baisse de pression pouvant être comprise par l'existence de forces de frottements à la traversée du bouchon poreux provoquant un ralentissement du gaz et une diminution de pression).

Propriété 1: La détente de Joule-Thomson d'un gaz quelconque est une **détente adiabatique, irréversible** et « **isenthalpique** » :

$$h(T_2, P_2) = h(T_1, P_1) \dots(3)$$

Propriété 2 : Dans le cas d'un Gaz Parfait, l'énergie interne ne dépendant que de la température, on en déduit que la détente de Joule-Thomson d'un gaz parfait est une détente « isotherme » :

❖ **Coefficient Joule-Thomson (J-T)**

- On appelle coefficient de Joule- Thomson la pente d'une courbe isenthalpique dans le diagramme (T, P) du fluide considéré.
- Il mesure la variation élémentaire dT de la température que provoque une variation élémentaire dP de la pression pendant une détente élémentaire isenthalpique du fluide :

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = \frac{\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T}{\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P} \dots(4)$$

où μ_{JT} le coefficient Joule-Thomson en (K/Pa)

- D'un point de vue pratique, puisqu'il est impossible de mesurer des changements infinitésimaux de températures et de pression, il est plus pratique de travailler avec des variations finies (ΔT et ΔP).
- Dans les faits, l'approximation suivante est valide sur les plages de pression et de température dans lesquelles l'expérience sera réalisée :

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H \approx \left(\frac{\Delta T}{\Delta P}\right)_H \dots(5)$$

❖ Température d'inversion

- On peut tracer dans un diagramme (T, p) le réseau des courbes $H(T, p) = Cste$ pour un fluide donné (**Figure III-3**).

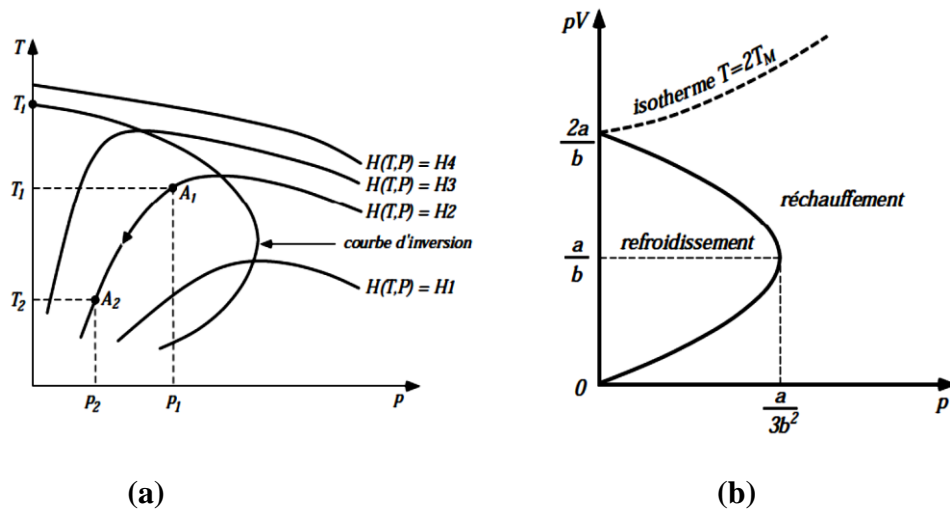


Fig. III-3 (a) Diagramme T-P pour un gaz réel

(b) Courbe d'inversion de la détente de Joule-Thomson

- Ainsi, pour une DJT élémentaire, lorsque

$$\mu_{JT} \begin{cases} < : \text{la température du fluide augmente} \\ = : \text{la température du fluide est constante} \\ > : \text{la température du fluide diminue} \end{cases}$$

- On observe que certaines des courbes isenthalpiques passent par un **maximum**, c'est-à-dire un **point où la pente est nulle** :

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = 0 \quad \dots(6)$$

- La courbe en pointillé qui relie ces points maximaux est appelée la « **courbe d'inversion** » et la température en ces points, la « **température d'inversion** ».
- La température au point où la courbe d'inversion intercepte l'ordonnée ($P = 0$) est appelée la « **température d'inversion maximale** ».
- On remarque que le coefficient de Joule-Thompson (**la pente d'une courbe isenthalpique**) est **négatif à droite de la courbe d'inversion** ($\mu_{JT} < 0$) et **positif à gauche** ($\mu_{JT} > 0$).
- Une détente isenthalpique se produit lorsqu'elle parcourt une courbe isenthalpique dans un diagramme (T, P) de la droite vers la gauche. Par conséquent, la température du fluide augmente durant une détente qui se produit du côté droit de la courbe d'inversion. La

température du fluide diminue durant une détente qui se produit du côté gauche de la courbe d'inversion.

- L'effet de refroidissement ne peut donc être réalisé à moins que la température du fluide soit inférieure à la température d'inversion maximale.

Le tableau ci-dessous (**Tableau III-1**) donne les températures d'inversion maximales pour quelques gaz.

Tableau III-1 Températures d'inversions maximales pour quelques gaz

Fluid	Maximum inversion temperature	
	K	°R
Oxygen	761	1370
Argon	722	1300
Nitrogen	622	1120
Air	603	1085
Neon	250	450
Hydrogen	202	364
Helium	40	72

III-5- Cycle de Linde –Hampson

- Le cycle Linde-Hampson est utilisé dans la liquéfaction des gaz, en particulier pour la séparation de l'air.
- Le système Hampson-Linde introduit un refroidissement par récupération. L'agencement de l'échangeur de chaleur permet aller au-delà d'une seule étape de refroidissement, et d'atteindre les basses températures nécessaires pour liquéfier le gaz.

Le cycle Linde- Hampson est décrit par le fluide est constitué de quatre transformations successives qui ont es propriétés suivantes (**Figure III-4**):

- 1-2** : Une compression isotherme du mélange (gaz d'appoint et gaz non condensé du cycle précédent) dans le compresseur,
- 2-3** : Un refroidissement isobare dans un échangeur de chaleur par le gaz non condensé du cycle précédent.
- 3-4** : Une détente isenthalpique dans la vanne de Joule-Thomson,
- 4-g-1** : Un réchauffement isobare de la fraction vapeur non liquéfiée dans l'échangeur de chaleur (l'état g) pour refroidir le gaz pressurisé avant qu'il ne s'engage dans le

h_2 l'enthalpie spécifique du gaz à la sortie du compresseur en (KJ/kg)

q_m le débit massique du gaz à l'entrée du cycle en (kg/s),

NB : le débit massique est conservé ($q_{m1} = q_{m2} = q_m$)

❖ **Le taux de liquéfaction** : La fraction du débit total de gaz liquéfiée est donnée par :

$$y = \frac{q_{mf}}{q_m} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \quad \dots(8)$$

h_f l'enthalpies spécifiques du gaz à la sortie du compresseur en (KJ/kg)

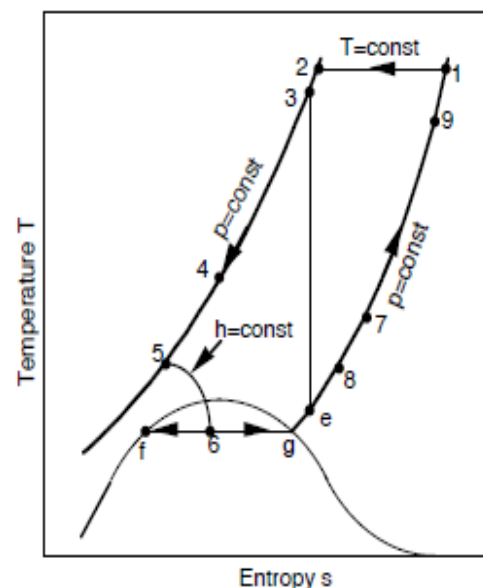
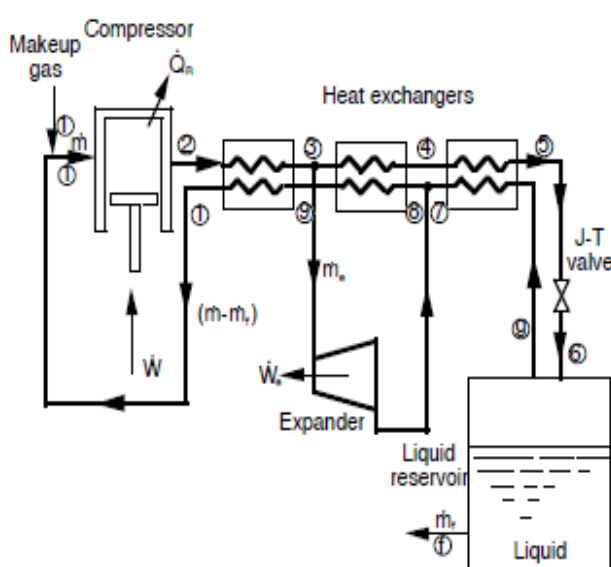
En combinant les équations (7) et (8), on obtient alors la fraction du débit total de gaz liquéfiée ($-\frac{\dot{W}_c}{q_{mf}}$):

$$-\frac{\dot{W}_c}{q_{mf}} = -\frac{\dot{W}_c}{y q_m} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] \left\{ \frac{h_1 - h_f}{h_1 - h_2} \right\} \dots(9)$$

III-6- Cycle de Claude

- Le cycle de Claude associe **deux détente, 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 détente 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 III-7**.



(b)

(b)

Fig.III-7 Le cycle de Claude (a) Représentation schématique (b) Diagramme T-s❖ **Taux de liquéfaction**

$$y = \frac{q_{mf}}{q_m} = \left[\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \right] + x \left[\frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f} \right] \quad \dots(18)$$

où $x = \frac{q_{me}}{q_m}$ 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**

$$\Rightarrow -\frac{\dot{W}_c}{q_m} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] - [x(h_1 - h_e)] \quad \dots(19)$$

❖ **Le travail mécanique dépensé par Kg de gaz liquéfié**

$$-\frac{\dot{W}_c}{q_{mf}} = -\frac{\dot{W}_c}{yq_m} = \frac{1}{y} \{ [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] - [x(h_3 - h_e)] \} \quad \dots(20)$$

III-7- Cycle de KAPITZA

- Le cycle Kapitza est une version modifiée du cycle Claude dans laquelle le **troisième échangeur** de chaleur à **basse température (BT)** est supprimé du système.
- Le **premier échangeur de chaleur** est en fait un **régénérateur** qui combine le processus de pré-refroidissement avec le processus de purification.
- Une autre modification pratique notable par rapport au cycle Claude est **que la turbine à mouvement alternatif** est remplacée **par un moteur d'expansion rotatif**.
- Les états de haute **pression (HP)** de cycle 4 et 5 et les états de **basse pression (BP)** 7 et 8 **sont identiques**.
- Les performances des cycles de Claude et Kapitza sont généralement étudiées pour l'air, l'azote, l'oxygène, l'argon, le fluor et méthane.
- 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 cycle Kapitza est illustré sur la **Figure III-8**.

❖ **Hypothèses**

- 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

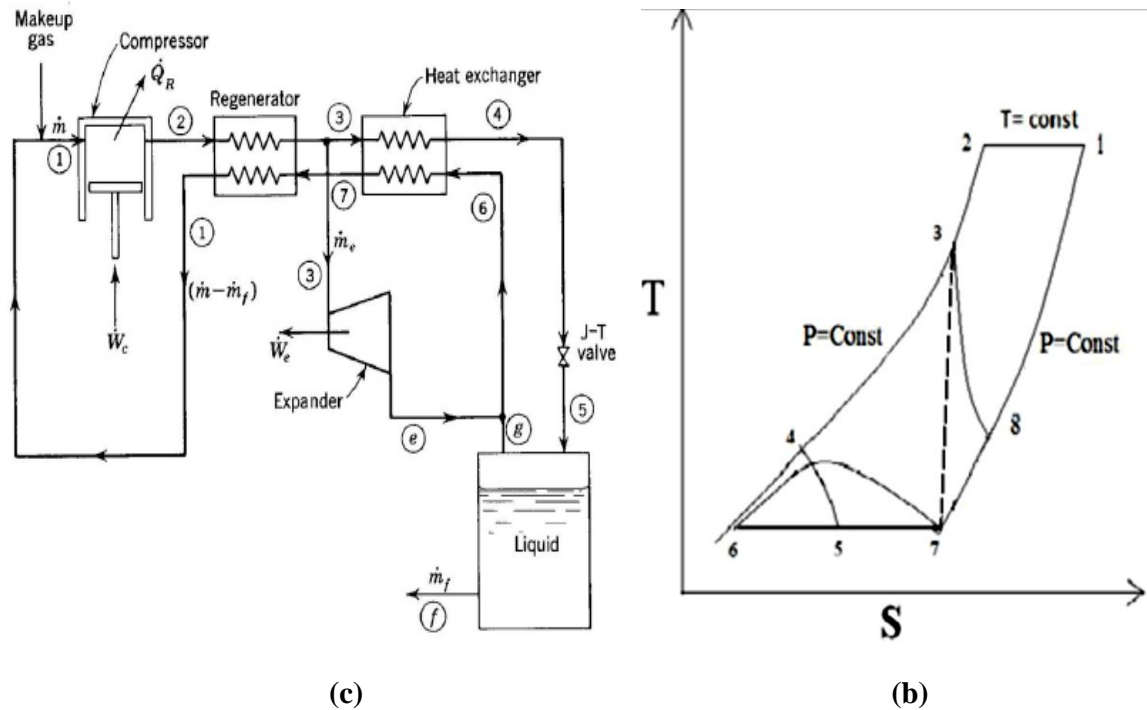


Fig.III-8 Le cycle de Kapitza (a) Représentation schématique (b) Diagramme T-s

❖ Taux de liquéfaction

$$y = \frac{q_{mf}}{q_m} = \left[\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \right] + x_e \left[\frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f} \right] \quad \dots(21)$$

où $x_e = \frac{q_{me}}{q_m}$ 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

$$\Rightarrow -\frac{\dot{W}_c}{q_m} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] - [x_e(h_3 - h_e)] \quad \dots(22)$$

❖ Le travail mécanique dépensé par Kg de gaz liquéfié

$$-\frac{\dot{W}_c}{q_{mf}} = -\frac{\dot{W}_c}{y q_m} = \frac{1}{y} \{ [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] - [x(h_3 - h_e)] \} \quad \dots(23)$$

III-8- Cycle de Heylandt

- 1- **CHRISTOPHWINDMEIER and RANDALL F. BARRON.** Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Cryogenic Technology. Chapter · September 2013.
- 2- **Min Soo, Kim** Cryogenic Engineering, 2015 Fall Semester.
- 3- **Rama Alsheikh and Kamel Youssef.** A thermodynamic study to improve the performance of the HELANDT cycle to produce liquefied air. the university of resurrection journal vol.39, Issue 34, 2017.
- 4- **M D Atrey,** Department of Mechanical Engineering, IIT Bombay.
- 5- **Kumar Punit, Shankar Ravi, Vijay Singh Bisht, Sumit Kumar.** CRYOGENICS: A Brief Review. International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 8, Issue 10, October-2017.
- 6- **AYAD Ouardia and CHOUMET Imen.** Projet de fin d'étude. Université de Bouira 2016.
- 7- **Hamed Rezaie, Masoud Ziabasharhagh and Mostafa Mafi** A review of hydrogen liquefaction, current situation and its future. International conference on engineering and applied sciences. UAE-DUBAI 10 March 2016.
- 8- **Pavitra Sandilya.** Upstream LNG Technology. Cryogenic refrigeration and liquefaction in natural gas systems. 26/04/2018.
- 9- **Qadri J.-Ph.** T4 – Appendice 1 D'ETENTES DE JOULE Bilans énergétique et entropique. <http://pcsi-unautreregard.over-blog.com/>.
- 10- **J.M Pfothauer.** Refrigeration & Liquefaction. University of Wisconsin – Madison.