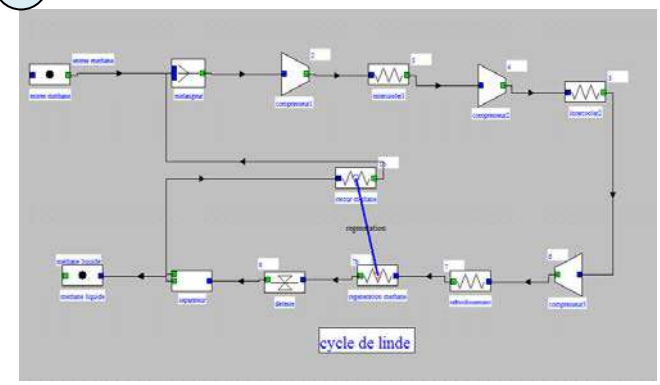
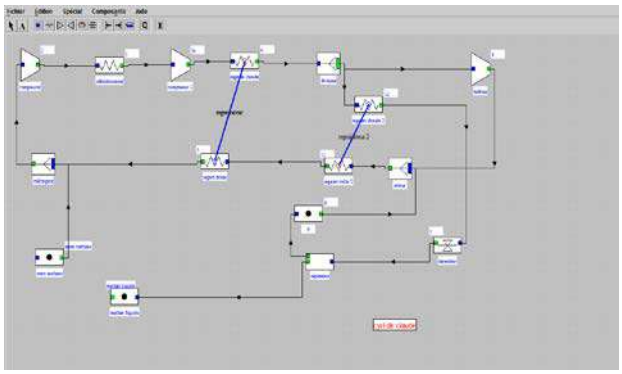
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTÉ DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme master2 en génie climatique option : énergie et froid industriel

Thème

Simulation et comparaison des cycles (Linde et Claude) de liquéfaction de l'air utilisant thermoptim





Élaboré par :

- ***KHEMILI FATIMA***
- ***OTMANI MOUNIRA***

promoteur : Dr.Z.TRIKI
co.promoteur:Mr.F.zaine

2016-1017

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celle qui passe au comble de la joie quand je suis heureuse et sombre dans la tristesse quand je suis triste.

A celle qui ne dit pas tout pour dire le tout : à Toi Ma Mère et à toi ma grand mère

A celui qui longtemps patienté pour cueillir les fruits de ma réussite : à Toi Mon Père.

A tout ma famille sans exception du plus grande au plus petit

A mes chère frères : djamel, mohamed, wassim, khalil, rabeh, tarik, mohamed 2, et hamoud,.

A les chère sœurs :khadija,fatiha,linda,safia,nassira djamila,soad,yasmine,serine,sara,et iline

A tout mes amis : mounira ,sohila

Fatima KHEMILI



Dédicaces

J'ai l'immense honneur de dédier ce mémoire :

- A mes très chers **parents** qui m'on soutenu et encouragé durant toute les années d'études.
- Je dédie ce travail aussi à mes très chers frères : **houari, Yassine, sedam,abd eldjalil** à ma très chère sœurs et sa petite fille **raina.**
- A mon fiancé **Mohammed.**
- A toute La famille **otmani et sadouki.**
- A mon binôme Fatima
- A monsieur le commandant **Dr.z.Triki** pour son Aide et ses orientations dans mon domaine.
- A notre missionnaire le commandant **Mr. F.zaine**
- À mes très chers amis : amel, salma, amira Fatiha.
- A tous mes amis de l'université.
- A tous mes enseignants qui ont fait leurs possibles pour nous donner le maximum d'informations concernant notre étude.



Otmani mounira



REMERCIEMENTS

Au terme de ce Mémoire nous tenons à remercier tout naturellement en premier lieu Dieu le tout puissant qui nous a donné la force, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

Nos vifs remerciements vont aussi à chaque membre du jury :
Le Docteur ABE DOURA, Med AZIZOU pour avoir accepté de présider ce jury.
Monsieur ZIRARI et Monsieur ZEROUAL BOUALEM pour avoir accepté d'être Examinateurs de ce mémoire.

*Ce travail a été réalisé sous la direction du Mr. TRIKI Zakaria**,** enseignant à l'université DR. YAHIA FARES, pour l'aide qui nous a apporté tout au long de l'élaboration de ce mémoire, merci pour la confiance que tu nous as témoignée en nous laissant souvent l'initiative dans nos travaux ainsi que dans la gestion de nos projet.*

Nos reconnaissance s'adresse ensuite à Mr. ZIAIN FAREK, Docteur à l'université DR. YAHIA FARES, au qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour sa patience, ses encouragements et ses précieux conseils durant le déroulement de ce travail.
Nous le remercions pour nous avoir fait confiance et nous lui disons que cela a été un véritable plaisir de travailler avec vous au cours de cette année.

Un hommage particulier à tous les enseignants du département de génie de la matière de l'université DR. YAHIA FARES. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour ses compétences.

Enfin nous tenons également à remercier toutes les personnes qui, de loin ou de prés, nous ont apporté leur soutien sans oublier nos familles et nos amis

Résumé

La production de l'air liquide a pour but de répondre aux besoins nécessaire de l'humanité pour l'utilisée dans différents domaine. Or, ce besoin n'est pas gratuit et il nécessite de l'énergie pour fonctionner.

Cette énergie est non seulement chère et son coût ne cesse d'accroitre mais aussi polluante, car souvent il s'agit d'une énergie fossile. Dans ce contexte, il est important d'améliorer le rendement afin de diminuer l'énergie consommée.

L'objectif de ce travail est la simulation des cycles de Linde et Claude pour la liquéfaction de l'air afin d'étudier l'effet des différents paramètres de fonctionnement sur la performance du cycle. Le logiciel thermoptime a été employé pour la simulation du processus.

Abstract

The production of liquid air aims at meeting the needs necessities of the humanity for use in various fields. However, this need is not free and it requires energy to work. This energy is not only expensive and its cost continues to increase but also polluting, because often it is about a fossil fuel.

In this context, it is important to improve the efficiency to decrease energy consumption.

The purpose of this work is the simulation of Claude cycl and Linde cycl for air liquefaction in order to Study the effect of the various operating parameters on the cycle performance. thermoptim tool was used to simulate process.

ملخص

يهدف إنتاج الهواء السائل إلي تلبية احتياجات الإنسانية الضرورية لاستخدامه في مجالات مختلفة.ومع ذلك هذه الاحتياجات ليست مجانية, وتتطلب طاقة لتعمل .هذه الطاقة ليست فقط باهظة الثمن وتكلفتها في تزايد مستمر ولكن أيضا ملوثة , لأنه في كثير من الأحيان هي عبارة عن وقود احفوري (متحجر).في هذا السياق من المهم تحسين الكفاءة للحد من استهلاك الطاقة.

الهدف من هذا العمل هو محاكاة دورة لاند و كلود لتمييع الهواء لدراسة تأثير معايير التشغيل المختلفة على أداء الدورة.

وقد تم استخدام برنامج THERMOPTIME لمحاكاة العملية في نظام الاستقرار.

Sommaire

INTRODUCTION…… 1

GÉNÉRALITÉS

1. Importance de la cryogénie ……..... 2

2. Historique du développement de la cryogénie …… 3

Chapitre I: cycle de liquéfaction de l'aire

I.1.introduction…… 8

I.2. Séparation de l'air……..... 8

I.2.1. Le méthodes de séparation d'air …… 8

1 .2.2. Les étapes de séparation d'air…… 9

I.2.3. Les développements récents dans la séparation cryogène de l'air …… 9

I.3.cycle de liquéfaction de Linde …… 10

I.3.1. historique …..... 10

I.3.2. type du cycle …… 11

I.3.3.principe et fonctionnement de cycle de Linde..... 13

I.3.2.a. colonne distillation normale…… 17

I.3.2.b. double colonne de Linde …… 15

I.3.4.paramètres de performance d'un système de liquéfaction …… 16

I.4.cycle de liquéfaction de Claude…… 17

I.4.1.historique et développement du cycle de Claude …… 17

I.4.2.types de cycle……. 18

I.4.2.1.Appareil de Claude a une seule expansion …… 18

I.4.2.2.Appareil composée de Claude à double expansion..... 19

I.4.2.2.la description de fonctionnement du cycle de Claude…… 21

I.5. paramètre de fonctionnement …… 22

I.6.paramètres de performance d'un system de liquéfaction …… 23

Chapitre II : simulation des cycles de liquéfaction de l'air.

II.1.définition de la simulation …… 24

II.2. historique de la simulation…… 24

II.3. logiciel de modélisation et simulation …..... 25

II.4.besoin requis et outils disponibles …… 25

II. 4.1.présentation du logiciel thermoptim …….. 27

II.4.2.principales fonctionnalité du simulateur …… 27

II.4.3. Les principales des constructions des modelés …… 28

II.4.4.le calcul des recyclages 28
II.6. Le système de propriétés physiques…… 28
II.6.1.environnement de simulation…… 29
II.7.les étapes de simulation et simulation de cycle étudient …… 29
II.8. Les différents modèles thermoptime utilisée pour la simulation des cycles de Claude.. 31
Il .8.1.modèle d'échanger de chaleur…… 31
II.8.2. modèle de compresseur…… 32
II.8.3. modèle d'échangeur de chaleur refroidisseur…… 33
II.8.4. modèle de séparateur …… 33
II.8.5. modèle de diviseur ……. 34
II.8.6. modèle de mélangeur …… 35
II.8.7. modèle de turbine …… 35
II.9 les étapes de simulation des cycles étudie……. …… 36
II.9.1. paramètre de performance…… 37
II.9.2 les paramètres tirés à partir des résultats…… 39
II.9.3 les paramètres à calculer…….. 40
II.9.4.les travail nécessaire par de masse de gaz comprimée ……..... 40

Chapitre III : résultat de discussion
III.1.Introduction..... 42
III.2.comparaison les cycles de liquéfaction (Claude, Linde)……. 43
III.3.1.l'effet de la pression de reforment (p) a la sortie du compresseur …… 43
III.3.2.l'effet de la température d'entre a turbine …… 44
II.3.3.l'effet de la fraction de gaz passant par turbine …….. 44

CONCLUSION …….. 46
BIBLIOGRAPHIE
ANNEXES

Liste de tableaux et des figures

LES TABLEAUX

Tab I-1: composition typique de l'air sec…… 9

Tab II.1: suivant donne le travail idéal de certains gaz à T=300 [K] et P= 101.3 [KPa]... 41

Tab III.1comparaison les cycles de liquéfaction (Claude et Linde)……... 43

LES FIGURES

1 : l'échelle des températures cryogénique…… 2

2 : Principaux domaines d'applications de la cryogénie…… 3

3 : Le développement cryogénique depuis 1850 à 1950…… 6

I.1 I.8(a) : une colonne de distillation normale…… 13

I.1.I.8(b) : double colonne de Linde (sans argon)…… 13

I.2(a) : procédé de Linde pour l'air liquide……..... 15

I.2(b) : production de froid à l'aide d'une valve d'expansion…… 15

I.3(a) : représentation schématique de processus simple de Linde…… 16

I.3(b) : diagramme T-S de processus simple de Linde…… 16

I.4: Principe de l'appareil de Claude…… 18

I.5: la forme modifiée de l'appareil de Claude…… 19

I.6: Appareil composée de Claude à double expansion…… 19

I.7(a) : représentation schématique de processus simple de Claude…… 21

I.7(b) : Diagramme T-S de processus simple de Claude……..…… 21

I.8 : Diagramme T-S de processus simple de Claude dans des conditions réelles…… 22

II.1: L'interface d'utilisateur…… 29

II.2 : Représentation du modèle échangeur……... 31

II.3 : Représentation du modèle compresseur……..… 32

II.4 : Représentation du modèle refroidisseur……. 33

II.5 : Représentation du modèle séparateur …… 34

II.6 : Représentation du modèle diviseur …… 34

II.7 : Représentation du modèle mélangeur…… 35

II.8 : Représentation du modèle turbine…..... 35

II.9: schéma cycle de Linde…… 36

II.10 (a): représentation schématique de processus simple de Linde …… 36

II.10 (b) : diagramme T-S de processus simple de Linde…… 36

II.11: schéma cycle de Claude…… 38

II.12 (a) : représentation schématique de processus simple de Linde…… 39

II.12 (b) : diagramme T-S de processus simple de Linde…… 39

Liste de tableaux et des figures

III.1: Rapport succès de la simulation de Linde…… 42

III.2: Rapport succès de la simulation de Claude……. 42

III.3: variation de taux de liquéfaction et travail de compression en fonction de pression refoulement…… 43

III.4: Variation de taux de liquéfaction et le travail de compression en fonction de température de gaz à entrée de turbine…… 44

III.5: Variation de taux de liquéfaction et le travail de compression en fonction de fraction de gaz de turbine…… 45

N O M E N C L A T U R E

Symbole	Signification	Unité
P	Pression	atm
R	Constante des gaz parfaits	Kj/K.mol
T	Température	K
V	Volume	m_3
Q	Quantité de chaleur	KJ
W	Travail	KJ/KG
X	Fraction du gaz passant dans turbine	
Y	Fraction liquéfié	
h	Enthalpie	KJ/KG
m	Masse	KG
s	Entropie	KJ/KG.K
ΔT_{lm}	Température logarithmique moyenne	K
	Indices et significations	

m molaire / **e** entrée / **s** sortie / **e** turbine/ **f** liquide saturé /
i idéal / **R** réfrigération/ **T** isotherme / **c** compresseur /

Introduction

Le globe terrestre est entouré d'une atmosphère constituée d'un mélange gazeux nommé air, qui s'étend de la surface du sol jusqu'à une altitude d'environ 150 kilomètres. L'abondance sans limite de ce mélange gazeux, son coût nul et son omniprésence en ont fait un sujet d'étude de choix dès l'Antiquité. Les chimistes ont cherché à en déterminer la nature et les physiciens se sont intéressés aux problèmes de sa masse et de sa pression.

Ce n'est cependant qu'au cours du XIXe siècle qu'une réelle technique a été découverte : la détente brusque d'un gaz comprimé s'accompagne d'un abaissement de température. Cette technique et d'autres processus qui ont été révéler par la suite, ont permet de liquéfier les composants de l'air, le chlore en premier, puis l'oxygène, puis l'hydrogène et après l'hélium en 1908. En moins d'un siècle, tous les gaz connus avaient été liquéfiés, et on avait atteint des Températures inférieures a -271 °C.

Le développement industriel a connu ses succès qu'après l'industrialisation du l'air liquide par Claude, Afin d'apporter notre contribution à l'amélioration du cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air avec l'utilisation des moyens technologique moderne, nous avons fait l'étude d'un sujet intitulé « Simulation des deux cycles Claude et Linde pour la liquéfaction de l'air ». Cette étude est composée de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation les cycles de liquéfactions de l'air et l'importance de la cryogénie et son histoire ainsi que les différentes étapes à suivre pour liquéfier l'air.

Dans le chapitre II, nous avons présenté simulation des cycles de liquéfaction de l'air, présentation du logiciel de simulation « **THERMOPTIM** », étapes de la simulation et simulation des cycles étudient.

Enfin, le chapitre III est réservé aux résultats et discussions de présentation des simulations, comparaison entre les cycles (Linde et Claude).

Généralité

de la cryogénie [1][13] :

La cryogénie est la science de très basses températures couvrant la gamme comprise entre 100 K (-173 ° C) et zéro absolue (0 K ou -273 ° C). Historiquement, le mot cryogénie a été dérivé

de deux mots grecs (krúos - géneia), on entend par ‘krúos’ le froid glacial et ‘géneia’ signifie produire. Cependant, la cryogénie traite avec des températures, essentiellement inférieures à -150

°C ou -123 K, parfois simplement en dessous de -100 °C ou 173K. Les substances ayant des points d'ébullition dans ce domaine de températures, comme indiqué dans la figure 1, sont appelés comme cryogènes.

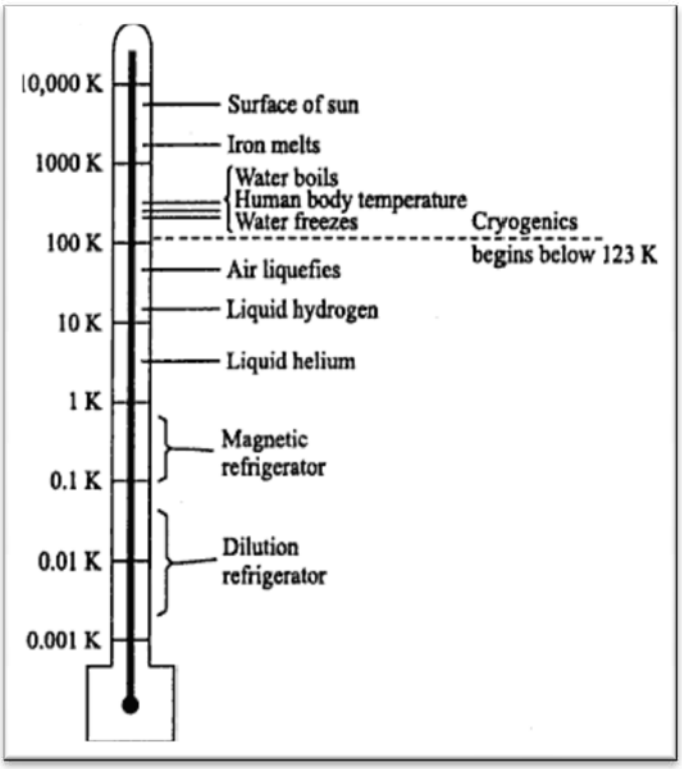


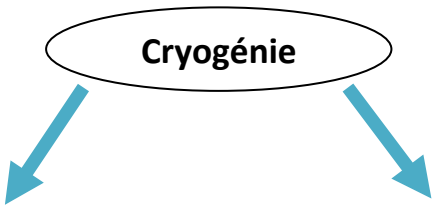
Figure1 : l’échelle des températures

L'importance stratégique de la cryogénie a été de plus en plus utilisée car son domaine de températures englobe le gaz naturel liquéfié (GNL), de l'oxygène liquide, azote liquide, argon liquide, l'hydrogène liquide et l'hélium liquide. Ces sont quelques-unes des cryogènes largement utilisés pour les différentes applications de la cryogénie. La Cryogénie répond à une variété de disciplines on cite comme exemple : les sciences biologiques et médicales, agro-alimentaire, la métallurgie,

les études de l'espace (les fusées), de l'électronique.

Les Processus cryogéniques se cryogénique rapportent à la production : de liquides cryogéniques et leurs stockages, et assurent le transport jusqu’a la consommation avec l'utilisation des basses températures, tandis que l'ingénierie cryogénique inclut la production des dispositifs des équipements et des installations

pour une exécution sécurisé, et économique (vis-à-vis à l’énergie).



Etudes fondamentales

Applications industrielles

Mesure aux basses températures Instrumentation et métrologie Accélérateurs et physique des particules Fusion contrôlée Astronomie	Electrotechnique : • Stockage d'énergie • Machine supraconductrices Electronique : • Composants • Détecteurs Transport : • Train à grande	Réfrigération : • Liquéfaction • Stockage des fluides Cryogénique Domaine spatial : • Propulsion • Isolation thermique Génie biomédical : • Imageurs • Conservation des fluides biologiques

Figure 2 : Principaux domaines d'applications de la cryogénie

2. Historique du développement de la cryogénie [1][2] :

On croit que la première liquéfaction réussie d'un gaz cryogénique na pas été réalisée avant 1877, l'ingénieur des mines français Cailletet qui a produit un brouillard de gouttelettes d'oxygène liquide. Il a réussi un pré-refroidissement d'un récipient rempli d'oxygène à 300 atm par l'ouverture de la vanne du récipient par laquelle le gaz s'est étendu.

Vers la même époque, un physicien suisse Pictet a également été indépendamment réussi à liquéfier l'oxygène par le refroidissement en cascade.

En 1883, deux physiciens polonais Wroblewski et Olszewski réussi à liquéfier l'oxygène et l'azote en quantité suffisante suite à des études expérimentales sur des mesures des propriétés cryogéniques. Un an plus tard ils ont essayé de liquéfier l'hydrogène par la technique d'expansion du Cailletet, par l'intermédiaire de pré-refroidissement de l'hydrogène à 100 atm à la température de l'oxygène liquide, puis tout à coup l'étendre à 1atm par la suite

Wroblewski à arriver à obtenir une brume contienne des gouttelettes d'hydrogène liquide mais il n'a pas réussi à obtenir de l'hydrogène complètement liquéfié.

Les chercheurs sont confrontés au problème de fuites de froid et "débouillissage" du liquide cryogénique, à la suite de laquelle l'hydrogène liquide pourrait être retenu que pour un temps très court. Ce problème de stockage d'un fluide cryogénique existe encore aujourd'hui. Ce dernier a été évité de façon à entourer le tube d'expérience contenant le fluide cryogénique par deux ou plusieurs tubes concentriques fermés à une extrémité, et en fournissant la vapeur à l'espace annulaire qui sépare les tubes. Ce concept prévaut dans les techniques modernes de conservation à froid ainsi le stockage de fluides cryogéniques à long terme et à grande échelle, avec une association supplémentaire d'une l'isolation très efficaces des matériels.

Une découverte a été faite à Londres en 1892 lorsque James Dewar a développé le vide enveloppé entre deux parois argentées à l'intérieure. Cette invention a facilité le succès de liquéfaction de l'hydrogène et l'hélium en grandes quantités en l898. James Dewar a aussi été le premier à utiliser une isolation sous vide. Parallèlement, Linde a obtenu un brevet sur la liquéfaction de l'air en Allemagne en 1885 il est devenu le pionnier dans la production des liquides cryogéniques à l'échelle industrielle. Dans la même année, Onnes Kammerling a établi un laboratoire de recherche en physique à basse température bien équipé, en Hollande, où il a réussi dans sa première tentative en 1908 à liquéfier 60 ml de l'hélium. Il a été rapporté qu'il produit jusqu'à 360 litres d'hélium gazeux en chauffant le sable de monazite de l'Inde, dont il se servait pour tous ses premières expériences sur l'hélium dans ce laboratoire. Onnes était le premier investigateur pour atteindre 1,04 K en 1910, tout en essayant de se solidifier l'hélium, en abaissant la pression du récipient. Un an plus tard Onnes découvert la supraconductivité par l'observation du phénomène de la résistance électrique du mercure près de zéro à la température du l'hélium liquide.

En 1902, un ingénieur français Claude créé l'Air Liquide il a développé la produire de son système de liquéfaction de l'air dans lequel une fraction importante de refroidissement a été obtenue en utilisant un moteur d'expansion. Cinq ans plus tard, en 1907, Linde installée le premier usine de liquéfaction de l'air aux Etats-Unis, alors que dans la même année Claude produite le néon en quantité suffisante en tant que sous-produit d'une usine de séparation d'air en France. Ce n'est qu'en 1916 que la première production commerciale de l'argon a été introduite par la société Linde aux Etats-Unis et un an plus tard, la première usine de GNL a été commandée pour la production de l'hélium, qui a été nécessaire pour les dirigeables dans la Première Guerre mondiale. Toutefois, la production commerciale du néon a commencé aux États-Unis que dans l'année 1922.

Au cours de la période entre les deux guerres mondiales, un certain nombre de développements ont eu lieu dans le domaine de la cryogénie et le monde a pris conscience de l'importance de la cryogénie dans le domaine de l'armement et fusées. En outre, en 1933, le refroidissement magnétique a été utilisé avec succès pour atteindre des températures ultra basses ci-dessous 1K. En 1934, Kapitsa a construit le premier moteur d'expansion à grande échelle de liquéfaction de l'hélium, qui a stimulé la recherche sur la supraconductivité. Après la seconde guerre mondiale, en 1947, Collins, un ingénieur en mécanique, mis au point un cryostat efficace pour la liquéfaction de l'hélium au MIT, Etats-Unis, qui a ensuite été commercialisé par A.D. Little Inc. Cela pourrait être utilisé pour la maintenance du température expérimentale des études entre la température ambiante et 2 K. L'impact de cette évolution a été si remarquable dans la dynamisation du niveau de confiance de chercheurs engagés dans des applications cryogéniques après cette époque tout a été plaisamment dénommée "BC" (Before Collins).

Un moteur à hydrogène liquide fusée a été développée en 1956 et cinq ans plus tard, en 1961, des teste de tir du premier véhicule spatial Saturn V a eu lieu, le propulseur a utilisé la combinaison de l'hydrogène liquide- oxygène liquide. Depuis ce temps, des nouvelles zones d'applications cryogéniques et les nouveaux dispositifs cryogéniques ont été développés. Les développements les plus récents sont continuellement prenant lieu, même aujourd'hui.

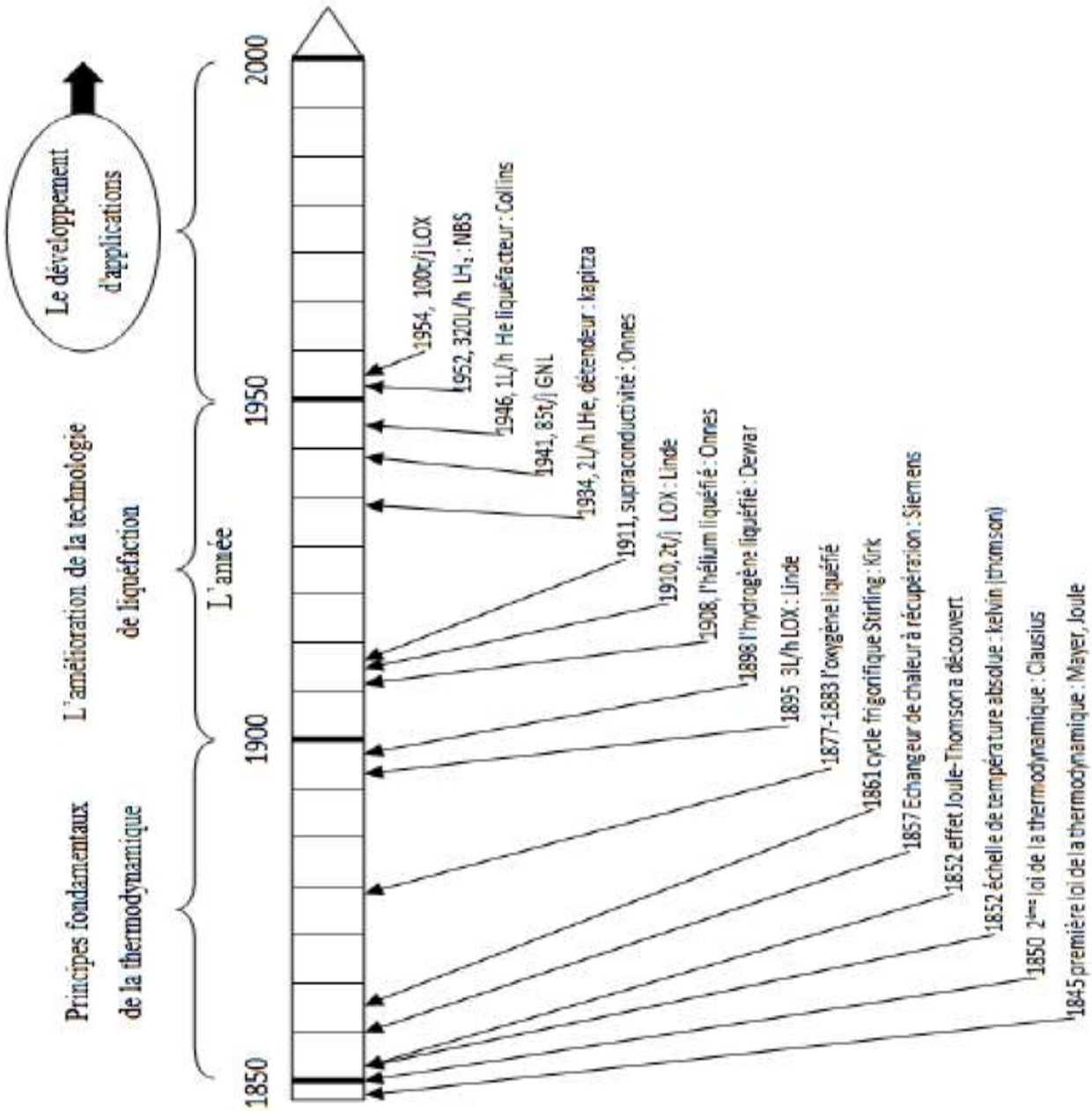


Figure 3 : Le développement cryogénique depuis 1850 à 1950

3. objectif de travail :

La liquéfaction des gaz est toujours un domaine important puisque la plupart des processus importants de la recherche scientifique et d'ingénierie à des températures cryogéniques dépend du gaz liquéfiés. La séparation de l'oxygène, l'azote et méthane de l'air est un exemple de ces processus. À des températures supérieures à la valeur du point critique, une substance existe dans la phase gazeuse. Les températures critiques de l'oxygène et d'azote sont -118,6 et -l47 °C, respectivement. Par conséquent, aucune de ces substances sera existent sous forme liquide dans des conditions atmosphériques. En outre, les basses températures de cette ampleur ne peuvent pas être obtenues avec les techniques de réfrigération ordinaires. Donc, l'utilisation des systèmes de liquéfaction des gaz reste actuellement le moyen le plus répandu pour obtenir et maintenir ces basses températures. Il existe de nombreux systèmes que nous avons déjà énumérés précédemment dans l'historique.

Nous intéresse dans notre étude sur simulation et comparaison de performance des cycles de liquéfaction le plus utiliser pour la produit de l'air liquide (cycle Linde et Claude).

Ainsi l'influence de déférents des paramètres de fonctionnement sur la performance de ses cycles sera étudiée.

Chapitre I

Cycles de liquéfaction de l’air

I.1.introduction [3] [4] [5]:

De nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour la séparation de l'air, certaines sans changement d'état, soit à l'ambiante, soit à plus basse température. Cependant, les plus employées dans l'industrie font appel à la liquéfaction, donc aux basses températures ; c'est le cas de la distillation et de la condensation fractionnée. Une partie des produits de la séparation peut être demandée à l'état liquide. On combine alors séparation et liquéfaction dans une même unité.

I.2. Séparation de l'air :

I.2.1.Les méthodes de séparation d'air [3] [4] [5] :

Les méthodes de séparation d'air comprennent à la fois les systèmes cryogéniques et non cryogéniques.

Les systèmes cryogéniques ont la capacité de fournir les plus grandes capacités pour les produits et pour des puretés très élevées. Les systèmes Non-cryogéniques sont employés à l'extrémité inférieure de l'échelle de production et en général pour des produits de puretés inférieurs. Les derniers systèmes sont basés sur l'adsorption modulée en pression (AMP) et les technologies membranaires. D'autres systèmes existent, basées sur des processus chimiques, mais ne sont actuellement pas en concurrence avec les trois procédés mentionnés.

Le processus cryogénique de séparation d'air est l'un des processus de séparation d'air le plus populaire utilisé pour produire des composants purifiés de l'air, en particulier l'oxygène, l'azote et l'argon. Dans le traitement du gaz cryogénique, divers équipements tels que la colonne de distillation, échangeur de chaleur, tuyaux d'interconnexion froid sont utilisés à très basse température. Par conséquent, tous ces équipements doivent être bien isolés. Les cycles de traitement sont quelque peu différente en fonction de combien de produits sont souhaités (soit de l'azote ou l'oxygène; oxygène et d'azote; ou de l'azote, oxygène et argon), les puretés requises pour un produit; les pressions de livraison des produits gazeux, et si un ou plusieurs produits est produite et stockée sous forme liquide.

Le tableau 1 montre la composition typique de l'air sec. Les principaux constituants sont l'oxygène, l'azote et l'argon. D'autres composants, tels que les gaz rares peuvent être extraits par voie cryogénique et sont utilisés commercialement.

Tab I-1: composition typique de l'air sec a

Composant	**Fraction de l'air**	**Composant b**	**Fraction de l'air**
Nitrogène	78,09 %	Méthane	1-2 ppmv c
Oxygène	20,95 %	Acétylène	< 1 ppmv
Argon	0,93 %	Krypton	1,14 ppmv
Le dioxyde de carbone	350 ppmv	L'oxyde nitreux	0,5 ppmv
	3-5 ppmv	Hydrogène	0,5 ppmv
Le monoxyde de carbone	18 ppmv	Ozone	0,4 ppmv
	5,2 ppmv	Xénon	0,086 ppmv
Néon			
Hélium			

(a) NB : l'air sec pris en charge

(b) Composition en volume

(c) ppmv : Partie par million en volume

I.2.2. Les étapes de séparation d'air [5]:

Les étapes détaillais de séparation d'air par un processus cryogénique sont les suivants :

1- Filtration et compression d'air. L'air comprimé est ensuite refroidi à proximité de la température ambiante en faisant passer à travers des échangeurs de chaleur refroidi par eau ou par air.

2- Élimination de la vapeur d'eau restante et le dioxyde de carbone. Ces composants de l'air doit être retiré pour répondre aux spécifications de qualité des produits. En outre, ils doivent être enlevés avant l'air entrant dans la partie de distillation de l'installation Carles très basses températures entraîneraient l'eau et le dioxyde de carbone à se geler sur les surfaces au sein de l'équipement du procédé.

3- La prochaine étape est le refroidissement qui s'effectue dans des échangeurs de chaleur en aluminium brasé qui permettent l'échange de chaleur entre le flux d'air chaud entrant et le gaz froid sortant du processus de séparation pour amener le flux d'air à la température cryogénique (environ -300 degrés Fahrenheit ou -185 degrés Celsius).

4- Les Colonnes de distillation sont utilisées pour séparer l'air en produits désirés. Pour faire de l'oxygène comme un produit, le système de distillation aura deux colonnes dépression «haute» et «bas». Les installations d'azote peuvent avoir qu'une seule colonne, bien que beaucoup en ont deux. L'azote quitte la partie supérieure de chaque colonne de distillation; l'oxygène sortant en fond. L'argon possède un point d'ébullition semblable à celui de l'oxygène et de préférence rester avec le produit d'oxygène. Si l'oxygène de haute pureté est nécessaire, l'argon doit être retiré du système de distillation en un point intermédiaire. L'oxygène impur produit dans la colonne initiale (haute pression) est en outre purifié dans le second (la colonne basse pression).

5- Les produits gazeux froids et le flux de déchets qui se dégagent des colonnes de séparation sont réacheminés à travers les échangeurs de chaleur.

I.2.3. Les développements récents dans la séparation cryogénique de l'air [4]:

Les premières améliorations dans la séparation et la liquéfaction d'air ont porté sur: les rendements d'extraction, la purification de l'air d'alimentation, l'efficacité des échanges thermiques, la régulation optimale des installations, et l'amélioration régulière des performances des turbines et des compresseurs.

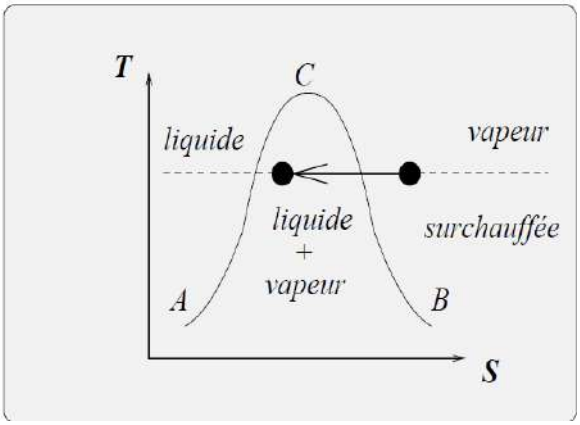
Plus récemment, ont été introduits : les garnissages pour les colonnes de distillation, les tamis moléculaires pour la pré-purification, la simulation pour le contrôle des procédés, ainsi qu'une performance des équipements accrue.

I.3.cycle de liquéfaction de Linde :

I.3.1.historique :

Historiquement vers 1790 Van Marum fut le premier à liquéfier de l'ammoniac en le comprimant sous 6 atmosphères. Différents gaz furent ainsi liquéfier : SO2, Cl2, H2S...Ces gaz présentent tous une température critique

Supérieure à la température ambiante : la liquéfaction de ces gaz s'effectue par une simple compression (ex : compression isotherme)



Principe :

Pour les gaz dont la température critique est inferieure à la température ambiante les premiers essais de liquéfaction furent réalisés par Cailletet (France)et Pictet (Suisse) en 1877. En 1895, Linde réussit à fabriquer pour la première fois de grandes quantités d'air liquide (L'air est forme de différents gaz. A une température supérieure à-140°C, l'air n'est plus liquéfiable).

La machine de Linde sera perfectionnée par Claude en 1905. Ces machines utilisent des cycles à détente.

On peut distinguer trois grandes familles de procédés thermodynamiques cryogéniques (T < 125K) :

1. Les procédés à détente isenthalpique de Joule-Thomson
2. Les cycles inverses de Brayton à détente isentropique
3. Les procédés mixtes associant une détente isenthalpique et une détente isentropique (cycle de Claude)

I.3.2.types de cycle :

Comme nous vus avant, KARL VON LINDE dans son invention était la double colonne et le processus de fabrication de l'air liquide.

Alors il sera primordial de détailler le principe de fonctionnement de la colonne double mais aussi que la colonne de distillation normale ou classique.

a) La colonne de distillation normale [19]

Le type le plus commun d'appareillage de distillation se compose d'une colonne avec :

- Rebouilleur au fond de la colonne pour produire la vapeur qui se lève dans la colonne
- Débouché ou une sortie pour le produit inférieur, en forme liquide

Une certaine matière d'agrégation de colonne (ce qui forme les plateaux) de sorte que la vapeur puisse entrer en contact intensif avec le liquide.

- Coté alimentation de la charge brut de l'air au centre.
- Débouché ou une sortie pour le produit de vapeur en haut de la colonne.
- Condenseur sert à la condensation de vapeur supérieure au liquide.
- Alimenter de nouveau à la colonne du liquide supérieur après condensation, ce liquide s'appelle le reflux.
- Une partie du liquide est sortie comme produit, qui s'appelle le distillat.

Voir le (la figure II-09) une colonne de distillation normale

b) DOUBLE COLONNE de LINDE (sans argon) [19]

Dans la plupart des cas les usines des séparation d'air utilise une combinaison de deux colonnes utilisées. C'était l'idée de KARL VON LINDE (Voir la figure II-8).

La partie inférieure est « demi » de colonne simple avec un condensateur dans le haut et une alimentation d'air par le fond. La partie supérieure est une colonne simple sans condensateur mais avec un rebouilleur.

Le condensateur dans la colonne inférieure agit en tant que rebouilleur pour la colonne supérieure. De l'air est alimenté au fond de la colonne inférieure, normalement à une température qui est juste au-dessus du point de condensation. La vapeur se lève vers le haut la colonne au condensateur et forme un reflux.

De l'air ne peut pas être chargé la forme liquide à cette colonne, car il ne contient pas un rebouilleur qui est exigé pour créer la vapeur. Nous avons déjà vu qu'au dessus de la colonne, il y a d'azote pur car il a un point d'ébullition inférieur que l'oxygène. Le produit inférieur ne sera pas pur, toutefois comparé à l'air qui a été chargé, c'est des riches de l'oxygène car l'azote a été sorti en tant que produit supérieur. Le produit inférieur, connu sous le nom de « liquide riche », contient l'oxygène approximativement de 35- 40 %.

Le liquide riche est alors alimenté à la pièce de centre de la colonne supérieure. Dans cette colonne il n'y a aucun condensateur, mais le reflux est pris du produit supérieur pur de la colonne inférieure. Au fond de la colonne, il y a un rebouilleur, qui est chauffé par l'azote condensé dans la colonne inférieure. Là, la colonne supérieure peut également distiller le reste du liquide riche en oxygène et autre, et nous pouvons avoir l'oxygène pur au fond, car l'oxygène a un point d'ébullition plus élevé que l'azote.

Pour pouvoir sortir le produit liquide, le froid (ou un certain liquide) doit être fourni. Ceci est habituellement effectué en prenant Nitrogène gazeux à partir du dessus de la colonne inférieure au soi-disant réutilisent, où l'azote liquide est produit et est alimenté de nouveau au même lieu dans la colonne inférieure.

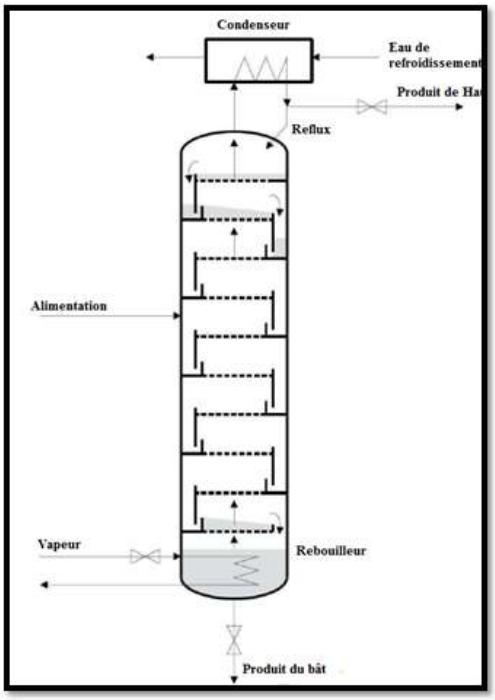


Figure I-8 (a) : Une colonne de distillation Normale. [19].

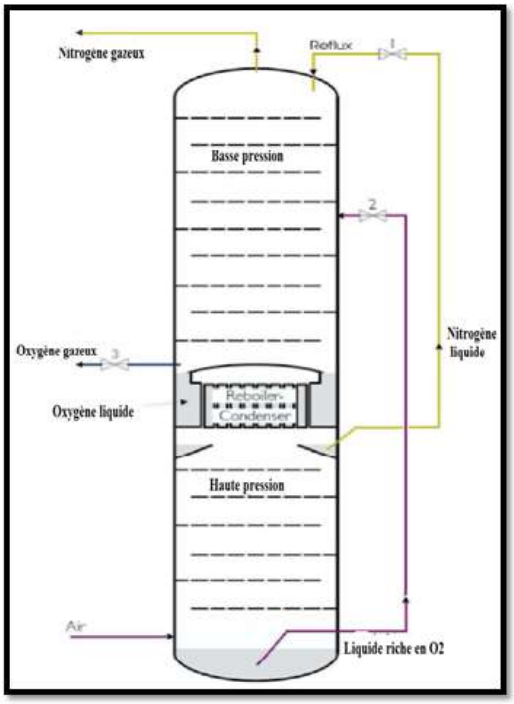


Figure I-8 (b) : Double colonne de Linde (sans argon). [19].

I.3.3.Principe et fonctionnement de cycle de Linde [19].

A la fin du 1800's, **Karl Von Linde** en Allemagne était le premier qui a commencer la production industrielle des gaz d'air. Son invention comme nous avons vu était la double colonne et le procédé qui porte son nom pour la liquéfaction de l'air.

Voir la figure II.2(a).Le processus de Linde pour l'air liquide [19].

Il a utilisé un compresseur à une pression de 200 bar, un échangeur de chaleur, une valve d'expansion et un réservoir de collection pour l'air liquide.

L'échangeur de chaleur était fabriqué par des tubes de cuivre épais, qui ont été enveloppés dans les spirales autour d'un pipe, et l'ensemble qui est couvert par une plus grande pipe.

L'air à haute pression est passé par les tubes de cuivre et l'air détendu ou bien après son expansion passe sur l'extérieur.

L'air est comprimé dans le compresseur de piston aux 200 bars et refroidi avec de l'eau à +20° C et séché. Si cet air va directement à une valve d'expansion, sa température devient -16° C à la pression de sortie de 1 bar.

Maintenant l'air est introduit dans un échangeur de chaleur et vient au début à +20° C avant la valve d'expansion. Car aucun liquide ne se forme, tout l'air est alimenté à -16° C de nouveau à l'échangeur de chaleur.

Commence alors à refroidir l'air à haute pression par l'air de basse pression, qui lui-même est chauffé vers le haut quelques degrés plus froid que +20° C.

Cette alimentation sera plus fraîche avant la valve et donc encore plus froide après.

Le refroidissement continue jusqu'à ce que le point de condensation d'air -191° C soit atteint.

Alors les premières gouttes d'air liquide commencent à se former et elles restent dans la réservoir de collection. Maintenant le processus entre dans une stable production et en continue et le liquide peuvent être envoyés à une colonne de distillation.

L'air de basse pression est sec donc s'il est renvoyé au compresseur, un dessiccateur de petite dimension peut être prévu.

On peut facilement dire que le froid est produit dans la valve d'expansion, car la température descend là, mais ce n'est pas le cas. Une valve peut pas ajouter ni emporte la chaleur. La production du froid est effectuée au compresseur avec le refroidissement suivant, qui enlève la chaleur de l'air.

Ce processus n'est pas aussi efficace, seulement environ 10 % d'air comprimé devient liquide.

Le reste d'air est employé pour le refroidissement dans l'échangeur de chaleur. Pendant que le reste de l’air est comprimé à 200 bar et ceci exige beaucoup d'énergie, la consommation d'énergie pour la production du liquide est relativement grande : 3.4 KWH/Nm3. Une petite amélioration est d'installer une machine de réfrigération qui refroidit l'air de -20 à -40°C.

Un tel processus est également montré sur le schéma de (la figure II.2(b)).

Production du froid est effectuée au compresseur avec le refroidissement suivant, qui enlève la chaleur de l'air.

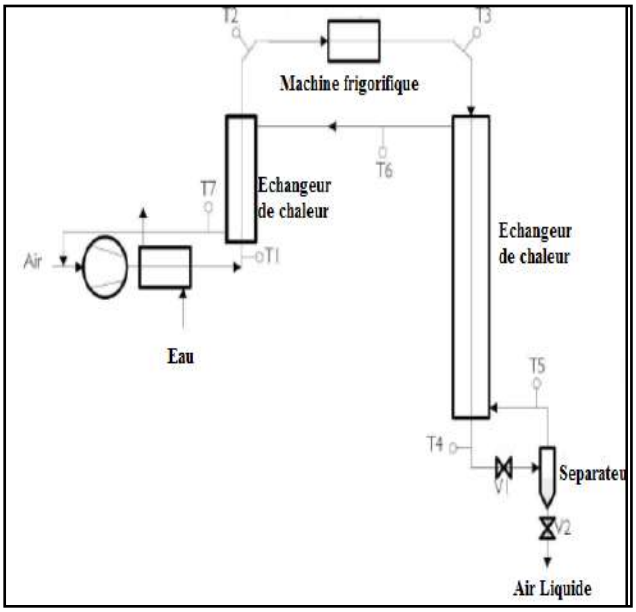


Figure 1.2(a) : procède du Linde pour l'air liquide. [19].

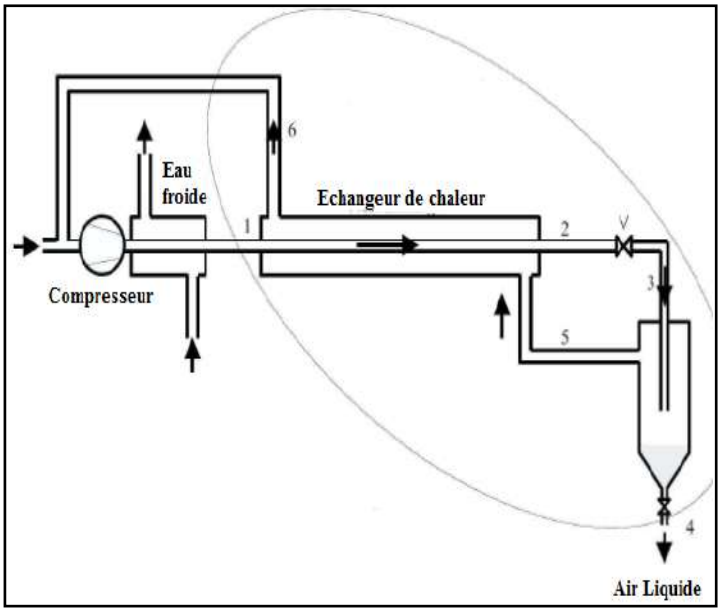


Figure I.2 (b) : production de froid à l'aide d'une valve d'expansion.[19].

Ce cycle comporte un refroidissement préliminaire permettant d'abaisser la température du gaz sous la température d'inversion de Joule-Thomson Cette température reste néanmoins supérieure a la température critique et ne permet donc pas la liquéfaction du gaz

Le gaz est ensuite détendu selon le processus de Joule-Thomson permettant d'atteindre une température inferieure à la température critique.

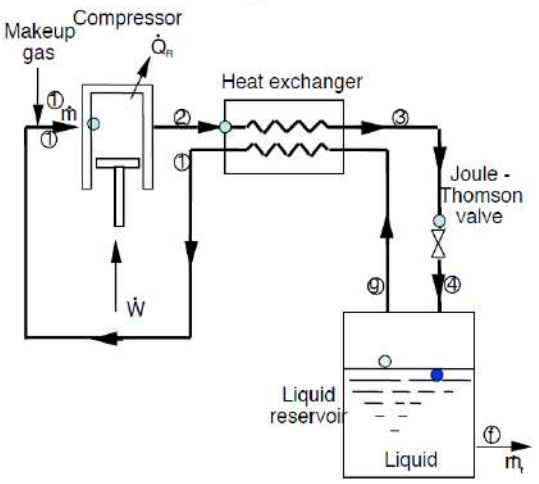


Figure I.3(a) : représentation schématique de processus simple de Linde

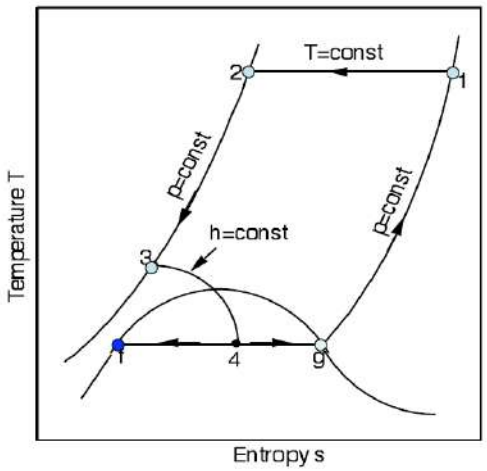


Figure I.3(b) : Diagramme T-S de Processus simple de Linde

. Les étapes du procédé de liquéfaction Linde sont les suivantes:

1-2 : compression isotherme.

2-3 : refroidissement isobare.

3-4 : détente isenthalpique.

g-1 : réchauffement isobare du gaz non liquéfié

Rappel :

La détente isenthalpique ne diminue la température du gaz que si sa température avant la détente est inferieure à la température d'inversion.

Remarque :

Dans ce mémoire s'intéresse au cycle à un seul expansion (simple).

I.3.4.Paramètres de performance d'un système de liquéfaction :

Il ya trois fonctions que nous pourrions utiliser pour indiquer la performance d'un système de liquéfaction:

1ére fonction : le travail nécessaire à la compression d'une unité de masse du gaz

$$w/m$$

2eme fonction : le travail nécessaire à la liquéfaction d'une unité de masse du gaz

$$w/m_f$$

3eme fonction : la fraction liquéfiée

$$y = \frac{m_f}{m}$$

Les deux dernières fonctions sont associées à la première par :

$$\frac{W}{m} = \frac{W}{m_f} y$$

Dans n'importe quel système de liquéfaction, nous devrions minimiser les exigences de travail et de maximiser la fraction de gaz qui se liquéfie.

I.4.Cycle de liquéfaction de Claude :

I.4.1. Historique et développement du cycle de Claude [11] :

Un nouveau nom apparaît dans le monde de liquéfaction du gaz, c'est Georges Claude.

Dans le cadre d'un certain nombre d'années de travail patient, il a pris une place à côté de Linde et les autres chercheurs qui ont développé le côté pratique de la liquéfaction du gaz.

Mais il faut se rappeler que c'est l'utilisation de l'azote de l'air qui a rendu le sujet praticable, et qui l'a converti à partir d'un procédé de laboratoire à une grande industrie manufacturière.

Pour l'oxygène il n'est pas nécessaire de prendre la même mesure que de l'azote. Il semble même la dispensation de la providence que l'azote est le constituant prépondérante de notre atmosphère.

Et comme Pictet et Linde, Claude a développé son appareil et des procédés pour la production d'oxygène.

L'oxygène est également à une importance nouvelle surtout avec l'extension de ses utilisations dans l'industrie, avec l'acétylène pour le soudage et la découpe de fer en particulier.

L'oxygène chalumeau utilisant du gaz blau ou de l'acétylène a permet aux travailleurs de soufflage de verre de transformer le sable. La soudure autogène est une autre marque application de l'oxygène chalumeau dans l'industrie.

I.4.2.types de cycle :

I.4.2.1. Appareil de Claude à une seule expansion [11][12]:

Dans une seule expansion, Claude obtient 80 pour cent de mélange d'oxygène et 99.8 pourcent d’azote, qui est pratiquement pur. Cette pureté est particulièrement importante dans le processus cyanamide, pour éviter le gaspillage du carbure.

La coupe illustre sur le schéma le principe de l'appareil Claude. À gauche c’est l'échangeur (M), indiquée par deux tubes concentriques. Le gaz froid à travers le tube extérieur à partir des passages d'appareils, se réchauffe car il donne son froid à l'air entrant ou un autre gaz qui passe à travers le tube central. Il serait plus exact de dire qu'il abstrait la chaleur du gaz entrant. Une partie du gaz qui entre est liquéfié, de sorte que le flux sortant est inférieur en quantité de celle entrant. A l'extrémité extérieure de l'échangeur, l'extrémité gauche de la coupe, il ne devrait pas avoir plus de trois ou quatre degrés de différence de température entre les deux flux de gaz.

L'air ou autre gaz à liquéfier est pompé à travers le tube central. Il pénètre dans le cylindre du moteur, sur la droite, et par un système vanne de coupure, se dilate pour une grande partie de la course. Cela se refroidit. Il pénètre ensuite dans le récipient (L), et comme il se précipite, une partie est liquéfiée. Le reste s'échappe à travers le tube externe de l'échangeur.

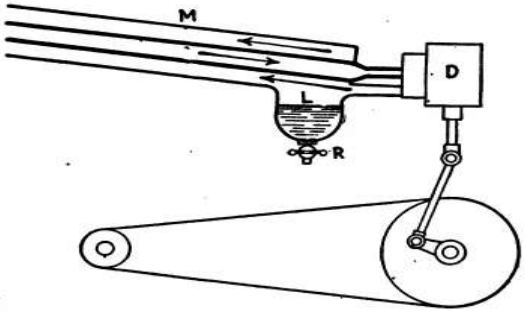


Figure I.4: Principe de l'appareil de Claude

Il n'ya pas un grand refroidissement supplémentaire: en même temps il est beaucoup moins pratique d'assurer une isolation thermique avec un cylindre d'expansion qu'avec un orifice de Joule-Thomson. Claude a ensuite obtenu un résultat plus économique en donnant la forme modifiée de son appareil montré dans la **Figure I.5.**

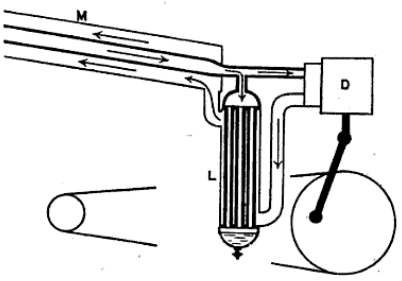


Figure I.5la forme modifiée de l'appareil de Claude

Dans cette disposition, partie de l'air comprimé se détend dans un cylindre de travail à une température qui peut être juste au-dessous de la température critique, et l'air qui est refroidi (mais non liquéfié) par son expansion est utilisé comme agent de refroidissement sur le reste de l'air, de sorte que certains de ces derniers est liquéfié sous la haute pression à laquelle il est fourni.

La fourniture arrive, sous une pression de 40 atmosphères environ, à travers le tuyau central de l'échangeur à contre-courant (M). Une partie de celui-ci, passe dans le cylindre d'expansion (D) où elle se dilate faisant un travail, et est ensuite déchargé à travers le récipient de condensation (L), où il sert comme un agent de refroidissement pour maintenir une température légèrement inférieure à- 140 ° C, la température critique de l'air. Le reste de l'air comprimé entre les tubes de (L) est condensé là, sous pression, passant sous forme liquide dans la chambre inférieure, à partir duquel il peut être soutiré.

I.4.2.2. Appareil composée de Claude à double expansion [11][12]:

Dans un développement ultérieur de son invention, Claude fait l'expansion composée, le gaz détendu à agir comme agent de refroidissement après chaque étape, devenant lui-même réchauffé dans le processus. Le gaz détendu, est ainsi préparé à subir une nouvelle expansion sans une chute excessive de la température. Lors de son expansion, le gaz dans le cylindre n'est pas si près de l'état liquide à rendre l'expansion dans

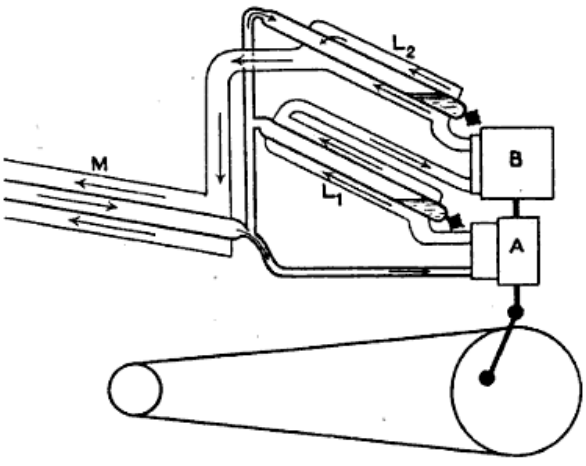


Figure I.6: Appareil composée de Claude à double expansion

un cylindre de travail peu d'utilité.

L’Appareil composé construit sur ces lignes générales et sur ces principes, peut avoir plusieurs cylindres et pistons, comme une machine à vapeur composé, La disposition avec l'expansion composée est illustrée dans la **Figure** I.6.

L'air sous pression pénètre, comme précédemment, à travers le tube central de (M). Une partie de celui-ci va au premier cylindre d’expansion (A), sous une pression réduite, et à une température inférieure au point critique, à travers le récipient externe du condenseur (L1), dans le tube intérieur dans laquelle une partie de l'air comprimé est condensé.

Dans une certaine mesure l'air détendu se réchauffe , et il passe ensuite à compléter son expansion en (B), ce qui ramène sa température suffisamment pour lui permettre d'agir comme agent de condensation pour la partie restante de l'air sous pression, dans le deuxième condenseur (L2), Cette division de l'expansion en deux (ou peut-être plus de deux) étages est équivalent à rendre le processus dans son ensemble plus près à isotherme, de sorte que l'air n'a pas besoin à tout moment s'écarter très largement d'une température qui est juste suffisamment en dessous du point critique pour permettre la liquéfaction d'aller sous la pression à laquelle l'air est fourni.

Remarque :

Dans ce mémoire s’intéresse au cycle à un seul expansion (simple).

I.3.3. La description de fonctionnement du cycle de Claude [1][10]:

La **Figure I.8**(a) décrit schématiquement le processus de Claude et la **Figure I.8**(b) décrit-le diagramme T-S.

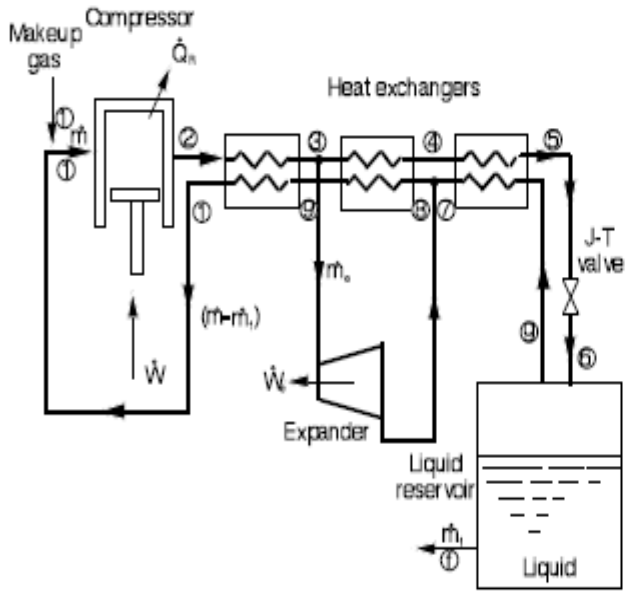


Figure I.7(a) : représentation schématique de processus simple de Claude

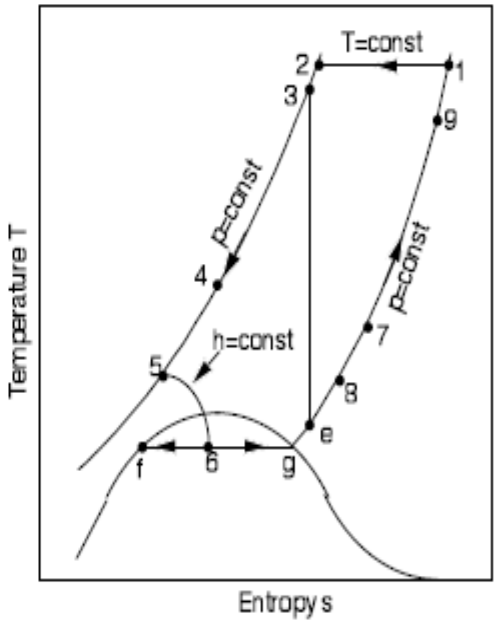


Figure I.7(b) : Diagramme T-S de processus simple de Claude

Dans ce processus, le moteur d'expansion est actionné de manière adiabatique et réversible (c'est-à-dire isentropiquement) pour abaisser la température d'une partie du gaz à haute pression, qui peut être utilisé pour refroidir le gaz à haute pression. Cela permet de réduire considérablement l'exigence de pression du gaz à haute pression de 200 atm à 40 atm.

Le gaz est d'abord comprimé et traversa le premier échangeur de chaleur. Environ 60-80% du gaz à haute pression est dévié vers turbine et réuni avec le flux de retour après le deuxième échangeur de chaleur. Le gaz à haute pression passe à travers les échangeurs de chaleur, deuxième et troisième et est finalement étranglé à la pression atmosphérique. La vapeur provenant du séparateur est renvoyée à travers les échangeurs de chaleur pour refroidir le gaz entrant qui est mélangé avec le flux sortie de turbine après le deuxième échangeur de chaleur. Le gaz retourné à la pression atmosphérique et à la température presque ambiante est recyclé avec le gaz d'appoint. La soupape de détente est encore nécessaire à la dernière étape de liquéfaction, en raison de turbine ne peut pas fonctionner efficacement avec une grande

quantité de liquide à la condition en aval. Les étapes du procédé de liquéfaction Claude sont les suivantes:

1-2: la compression isotherme

2-3: pré-refroidissement par le flux de retour dans le premier échangeur de chaleur

3-4: pré-refroidissement par le flux de retour dans le deuxième échangeur de chaleur

3-e: Une partie du gaz à haute pression est expansé isentropiquement par un moteur d'expansion

4-5: pré-refroidissement par le flux de retour dans le troisième échangeur de chaleur

5-6: l'expansion d'étranglement à la pression ambiante

6-g: séparation de la vapeur saturée à partir du séparateur

6-f: Séparation de liquide saturé à partir du séparateur

g-7: retour de vapeur saturée à la pression ambiante pour fournir un refroidissement en 4-5

e-8: Mélange de flux de sortie froid du moteur d'expansion avec le flux de retour

8-9: Le retour du flux mélangé à la pression ambiante pour fournir un refroidissement en 3-4

9-1: Le retour du flux mélangé à la pression ambiante pour fournir un refroidissement à 2-3

Le processus de l'état (5) à l'état (6) est isenthalpique. Le Processus de l'état (3) à l'état(e) est isentropique sous des conditions idéales, mais dans des conditions réelles l'entropie augmente comme le montre la **Figure I.8**. Les points 2-5 sont à la haut pression alors que les points (f), (g), (e), (8),(7), (9) et (1) sont à la basse pression, en ne supposant aucune chute de pression lors de l'écoulement.

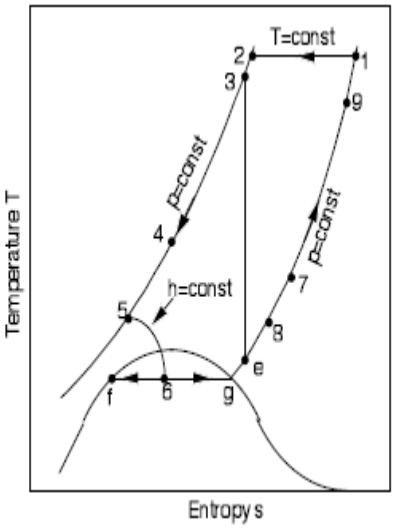


Figure I.8 : Diagramme T-S de processus simple de Claude dans des conditions réelles

I.4.4.Paramètres de fonctionnement :

Dans n'importe quel système de liquéfaction, nous devrions vouloir minimiser les exigences de travail et de maximiser la fraction de gaz qui se liquéfie.

Pour notre étude sur le cycle de Claude, il ya trois paramètres de fonctionnement leur variation ayant un effet sur le cycle. Les appelle 'variables de processus' qui sont :

1. La pression à la sortie du compresseur.
2. La température à l'entrée de turbine.
3. La fraction détournée vers l'expansion

I.5.Paramètres de performance d'un système de liquéfaction :

Il ya trois fonctions que nous pourrions utiliser pour indiquer la performance d'un système de liquéfaction:

1ére fonction : le travail nécessaire à la compression d'une unité de masse du gaz

$$W/m$$

2eme fonction : le travail nécessaire à la liquéfaction d'une unité de masse du gaz

$$W/m_f$$

3eme fonction : la fraction liquéfiée

$$y = \frac{m_f}{m}$$

Les deux dernières fonctions sont associées à la première par :

$$\frac{W}{m} = \frac{W}{m_f} y$$

Dans n'importe quel système de liquéfaction, nous devrions minimiser les exigences de travail et de maximiser la fraction de gaz qui se liquéfie.

Chapitre II

Simulation des cycles de liquéfaction de l'air

II.1 Définition de la simulation [14]:

La révolution actuelle en matière de technologie d'information, ainsi que les progrès impressionnants en matière de technologie de modélisation et de simulation a un impact significatif sur la science. Un nouveau paradigme se dessine, où la simulation est impliqué à travers toutes les étapes du cycle de vie du processus, à partir d'idée effectué par des expériences dans les laboratoires.

La simulation numérique (ou expérience numérique) permet de reproduire sur un ordinateur un phénomène physique complexe dont on souhaite étudier l'évolution. Elle repose sur la programmation de modèles théoriques ou mathématiques (intégration des équations du mouvement, d'équations différentielles, etc…) qui sont adaptés aux moyens numériques. Ces simulations informatiques sont devenues incontournables pour la modélisation des systèmes naturels en physique, chimie et biologie, mais également des systèmes humains en économie et en science sociale pour lesquels les expériences sont difficiles, coûteuses voire impossibles.

Un modèle de simulation sert à effectuer des «expériences virtuelles». Presque invisible dans la plupart des cas, être incorporés dans la technologie des logiciels, la modélisation est l'élément clé dans chaque simulation. Il est important de garder à l'esprit que la simulation n'est qu'une représentation approximative de la réalité, à un certain niveau de précision, et non la réalité elle-même. C'est pourquoi l'utilisateur doit toujours être en mesure d'évaluer la fiabilité des résultats délivrés par un simulateur.

II.2 Historique de la simulation [14]:

L'histoire de la simulation de processus a commencé en 1966, quand une petite entreprise située à Los Angeles (USA), a eu l'idée de commercialiser un programme informatique générique pour la simulation de colonnes de distillation. Ce fut le cœur d'un paquet flowsheeting processus, ce qui pourrait être considéré comme l'ancêtre des simulateurs de processus.

Trois ans plus tard ChemShare (Houston / USA) a publié un 2emme design du programme flowsheeting pour les applications de gaz et de pétrole. A cette époque, l'expansion des industries du raffinage et la pétrochimie motivé l'avènement de progiciels.

Au cours de la période 1970-80 le calcul scientifique a connu son âge d'or. Les algorithmes utilisés aujourd'hui ont des racines profondes dans les méthodes mises au point à ce moment-là. Langage de programmation Fortran est devenu très populaire parmi les scientifiques et les ingénieurs.

Les simulations ont été exécutées sur des systèmes mainframe rapides mais coûteux, à laquelle l'utilisateur était connecté via un terminal distant. Le fichier d'entrée était un tasde

cartes. Plus tard, l'entrée des données est devenue possible en éditant un fichier sur un écran électronique, les instructions pour l'exécution des travaux étant codées par l'intermédiaire d'un langage spécifique, basé sur des mots-clés.

En 1976, US Département of Energy et le MIT a lancé conjointement le projet thermoptim. L'avènement des systèmes de calcul haute-vitesse stimulé l'activité de petites sociétés spécialisées dans la modélisation et la simulation.

Au début des années 1990 la domination des produits micro-ordinateurs était un fait.

La stabilisation relative dans les systèmes d'exploitation, dominée aujourd'hui par UNIX et Windows, Le pouvoir des anciens superordinateurs était disponible sur les ordinateurs de bureau.

Au début des années de 1990 les micro-ordinateurs on connu un développement relative sur les systèmes d'exploitation, dominée aujourd'hui par Unix et Windows, ce dernier a permis le développement d'une nouvelle génération de logiciels de simulation.

L'interface graphique est devenue un élément central dans le développement de logiciels.

II.3 Logiciels de modélisation et simulation [17]:

Pour modéliser et simuler les processus cryogéniques, un logiciel a du être sélectionné. Il devait intégrer:

- Un outil de modélisation pour concevoir des composants cryogéniques à partir d'équations linéaires ou non-linéaires, algébriques ou différentielles. Le langage de programmation utilisé doit être orienté objet pour faciliter la mise en œuvre de systèmes complexes
- Un outil de conception doté d'une interface graphique permettant de construire facilement des systèmes complexes à partir de bibliothèques d'objets
- Un outil de simulation comprenant un résolveur d'équations pour réaliser des simulations dynamiques.

II.4 Besoins requis et outils disponibles [17]:

Il existe un grand nombre de logiciels de modélisation et de simulation commerciaux sur le marché. Une étude de nos besoins a permis lister les caractéristiques nécessaires à la bonne mise en œuvre d'un simulateur cryogénique :

- Conduire des simulations statiques et dynamiques
- Développer des modèles hybrides utilisant des évènements continus et discrets
- Modéliser des phénomènes thermodynamiques et mécaniques (solides et fluides)
- Modéliser certains aspects de contrôle séquentiel ou des signaux électriques permettant de piloter des actionneurs

- Intégrer d'un résolveur d'équations efficace pour résoudre des systèmes d'équations de grande taille dans un temps raisonnable (systèmes de plusieurs milliers de DAEs)
- Réaliser les simulations en temps réel ou plus rapidement
- Exporter les résultats des simulations sous forme de fichier texte importable dans d'autres applications type MATLAB pour analyses post-simulation
- Utiliser des bibliothèques externes écrites en C/C++ ou Fortran à l'intérieur des composants
- Exporter les modèles en C/C++ pour permettre le développement externe d'un programme autonome utilisant le modèle développé.
- Après une première évaluation des solutions commerciales disponibles, cinq logiciels ont retenu notre attention :
- Dymola de Dynasim AB (Suède) et Dassault Systèmes (France). Ce logiciel utilise le langage ouvert Modelica. Il est très utilisé dans la communauté mondiale de la simulation dans un grand nombre d'applications. Il existe énormément de bibliothèques gratuites et le logiciel évolue continuellement mais aucune bibliothèque n'est disponible pour la cryogénie ou l'hélium. Dymolagénère un code en C++ recompilable pour exporter les modèles. Cependant, le code n'est pas documenté et peu clair pour être réutilisé dans un autre programme.
- MathModelica de MathCore Engineering AB (Suède). Logiciel similaire à Dymolaen termes de langage et performances. Les différences viennent principalement des possibilités d'interfaçage vers d'autres applications (Matlab, Simulink,

Mathematica...). Le code C++ généré est également non documenté.

- EcosimProde EA International (Espagne). Ce logiciel utilise son propre langage de programmation orienté objet (le langage EL). EcosimPro n'est pas aussi connu que Dymola et il est principalement utilisé en Espagne. Il a cependant déjà prouvé son efficacité dans plusieurs domaines, particulièrement dans les processus industriels et dans le domaine aérospatial. Son principal avantage est que les modèles peuvent être exportés facilement dans une classe C++ et que le code est bien documenté.
- Visual Modeler d'Omega Simulation (Japon). Il est principalement utilisé pour modéliser des processus industriels type pétrochimiques. Il utilise un langage propre(Equatran).
- thermoptim Ce logiciel utilise son propre langage de modélisation et il est spécialement conçu pour simuler des usines entières comme des raffineries de pétrole. La plupart des composants nécessaires en cryogénie comme les échangeurs de

chaleur, les vannes, les séparateurs de phases sont déjà développés et une bibliothèque d'hélium est présente (mais elle est malheureusement limitée en terme de propriétés disponibles et elle n'est pas valideen dessous de 2 K).

Cependant, les modèles paraissent très complexes et les équations régissant les comportements des composants ne sont pas apparentes. Il peut alors être ardu de comprendre ce que calculent les modèles et dans quelles conditions. Néanmoins il est possible de développer ses propres composants mais cela est moins aisé que dans les autres logiciels.

- Tous ces logiciels peuvent être utilisés pour développer des modèles et réaliser des simulations dynamiques pour des systèmes complexes de grande taille et certains d'entre eux ont déjà été utilisés en cryogénie. Selon nos critères, thermoptim est le meilleur candidat.

II.5. Présentation du logiciel thermoptim:

Le progiciel Thermoptim un environnement de modélisation systémique des technologies énergétiques très original et sans équivalent, qui rend possible l'adoption de nouvelles méthodes en matière de pédagogie, de modélisation et d'optimisation.

II.5.1 Principales fonctionnalités du simulateur :

THERMOPTIM permet de faire :

- Représentation par simple assemblage graphique de systèmes énergétiques très variés de complexités diverses
- Modélisation phénoménologique ou/et technologique des composants
- Double démarche analytique / systémique
- Bibliothèque des propriétés des corps couramment utilisés
- Extension du noyau du progiciel permettant l'ajout de composants externes et le pilotage personnalisé des calculs
- Un outil utilisable aussi bien pour l'initiation que pour résoudre des problèmes industriels

En effet, THERMOPTIM permet de calculer automatiquement l'état complet (température, pression, volume massique, enthalpie, énergie interne, entropie, exergie, titre) de différents fluides, qui peuvent être des gaz idéaux ou des vapeurs condensables. Ces fluides peuvent subir diverses transformations :

- des compressions et des détentes (système ouvert ou fermé ; adiabatiques ou polytropiques ; rendement isentropique ou polytropique) .
- des combustions, elles aussi en système ouvert ou fermé, à pression imposée, volume imposé ou température constante.

- des laminages isenthalpiques.
- des échanges de chaleur avec d'autres fluides, le progiciel pouvant calculer le produit UA du coefficient d'échange thermique par la surface de l'échangeur, pour des configurations à contre-courant, co-courant, à courants croisés.

De plus, le progiciel possède une base de données des propriétés thermodynamiques des corps les plus couramment rencontrés en pratique. La précision sur l'eau et les gaz idéaux est excellente, celle sur les autres vapeurs condensables légèrement moins bonne.(cf. ammoniac pour notre cycle fermé)

II.5.2.Principe de construction des modèles :

Construire avec THERMOPTIM le modèle d'un système thermodynamique est très simple et se fait en deux étapes :

- on commence par en faire une description qualitative en le représentant graphiquement comme un ensemble de composants (plus généralement de fonctionnalités) connectés entre eux par des liens vectoriels représentant les canalisations de fluide ou les échangeurs de chaleur.
- on quantifie ensuite le modèle ainsi défini en paramétrant les différents types primitifs qu'il met en jeu, pour pouvoir en calculer les performances.

II.5.3 Le calcul des recyclages :

Dans une approche séquentielle-modulaire, les recyclages sont convergés itérativement: on définit un courant "coupé", et on établit un processus de convergence sur les variables de ce courant coupé, en calculant de façon itérative les opérations de la boucle de recyclage.

A partir d'une description de la structure du procédé (schéma de connexion des opérations unitaires) le logiciel détermine automatiquement les boucles de recyclage, choisit les courants à couper pour permettre la convergence, et détermine la séquence de calcul des opérations unitaires.

Il est néanmoins possible pour l'utilisateur de choisir d'autres courants coupés que ceux proposés par le logiciel, ce qui est très utile lorsque l'on sait en initialiser les valeurs.

II.6. Le système de propriétés physiques

Les propriétés physiques (thermodynamiques et propriétés de transport) sont nécessaires au cours d'une simulation pour le calcul des opérations unitaires (équilibres liquide-vapeur et enthalpies), et pour le dimensionnement (viscosité, conductivité thermique, ...)

Un système de calcul de ces propriétés physiques donne ces propriétés comme fonctions des variables d'état (température, pression, composition), à partir de modèles d'origine empirique ou moléculaire, en utilisant des paramètres stockés dans des banques de données (coordonnées critiques, paramètres de corrélation). thermotim fournit un grand nombre de "méthodes" de calculs pour ces propriétés physiques, collections de routines de calcul des propriétés physiques qui sont directement utilisées par les modèles d'opérations unitaires.

Le choix raisonné des modèles et corrélations adaptées au calcul des propriétés thermodynamiques et de transport pour un type de mélange donné est souvent un domaine de spécialiste.

II.6.1. Environnement de simulation [18]:

L'environnement de simulation contient la feuille de distribution principale, où nous faisons la majorité de notre travail (dessin de l'installation, définition des débits, les opérations unitaires).

II.7.Les étapes de simulation et simulation des cycles étudient.

II.7.1 Caractéristiques de l'interface d'utilisateur :

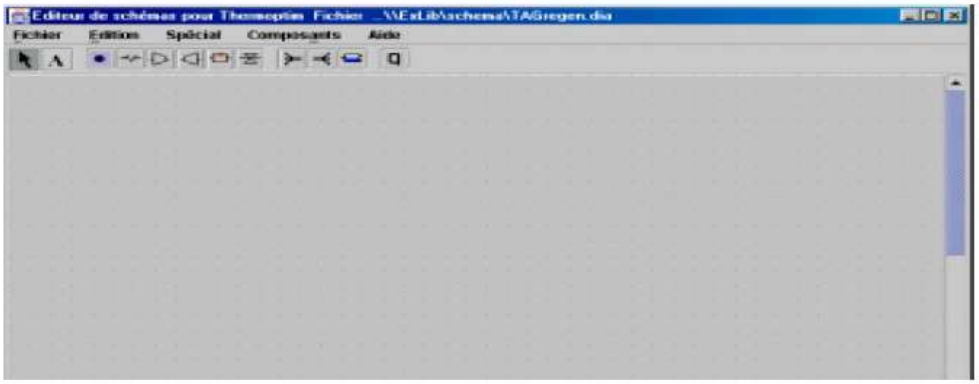


Figure II.1: L'interface d'utilisateur

Menus: est utilisés pour spécifier les options de programme et des commandes.

Fichier : (ouvrir, enregistrer sous…, bibliothèque de schémas, descriptif, bibliothèque de projets associes, imprimer, quitter)

Composantes : représentables (échanges de chaleur, compresseurs, organes de détente, chambre de combustions, mélangeur, diviseur, séparateur, sources externes). Et un panneau de travail où l'on place ces composantes.

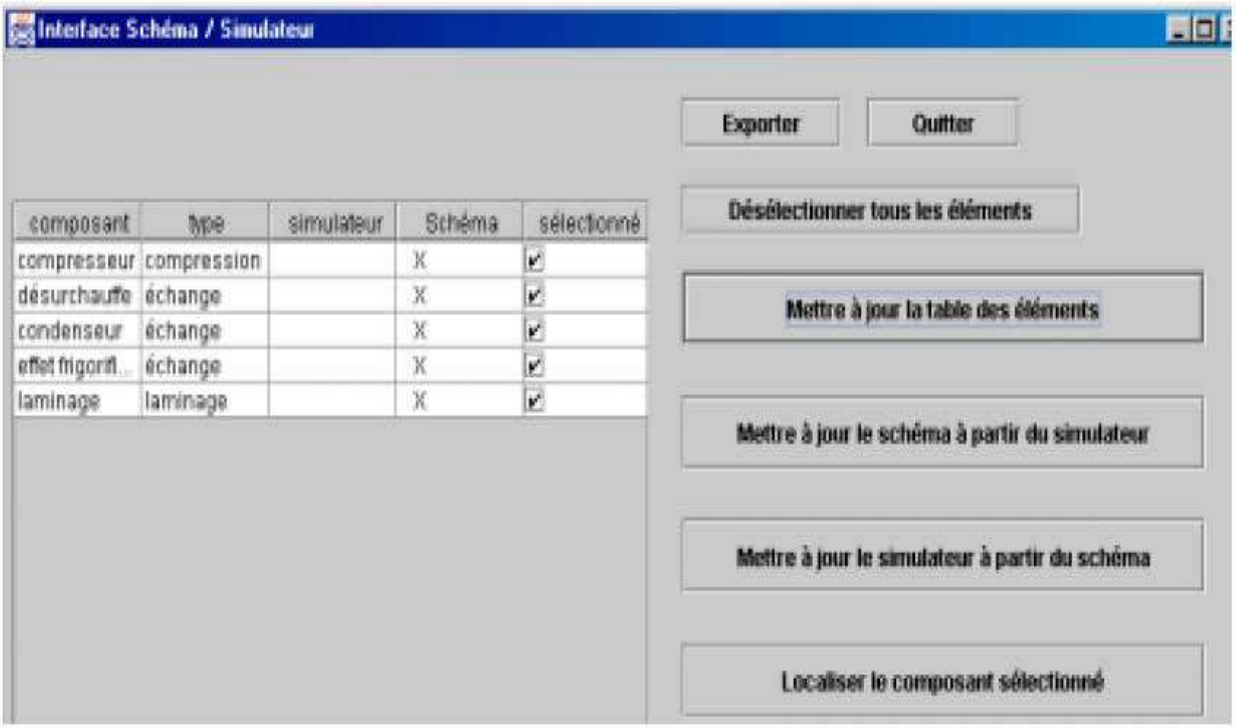
Spécial : (afficher les valeurs, dimensions de plan de travail, interface schéma / simulateur)

Edition : (sélection, miroir vertical, afficher les propriétés, renommer, effacer le schéma, afficher les branche séparées dans les nœuds, supprimer du schéma)

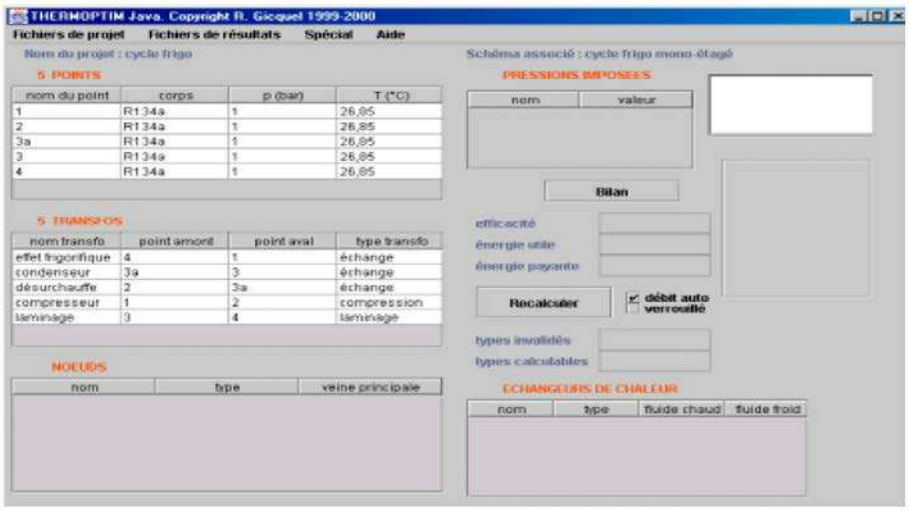
Aide : référence rapide.

Création des éléments du simulateur :

Pour créer les éléments du simulateur le plus simple est d'utiliser l'interface qui relie à l'éditeur de schéma, et qui peut être ouverte à partir du menu spécial. Cliquez alors sur le bouton ' mettre à jour la table des éléments ' .



Dans la table de gauche apparait la liste des composants que vous avez crées .en face de chacun d'eux .un X marque la case ''schéma ''.alors que la case ''simulateur '' est vide la colonne de droite indique quels sont les composants sélectionnés, c est à dire ceux qui doivent être pris en compte lors des opérations réalisées à partir de l'interface .par défaut tous les composants sont sélectionnes , mais un bouton vous permet de les désélectionner tous si vous le désirez Autrement, en double-cliquant sur un e ligne de la table , vous la sélectionnez ou la désélectionnez.



Pour transférer dans le simulateur l'ensemble des composants, cliquez sur le boutent '' mettre à jour le simulateur à partir de schéma''. Un nom vous est demande pour le projet, entre par exemple '' cycle à vapeur simple ''.

II.8 Les différents modèles thermoptime utilisés pour la simulation des cycles de liquéfaction de l'air :

II.8.1modèle d'échangeur de chaleur :

Le modèle d'échangeur permet de modéliser les échangeurs de chaleur, à Co-courant ou A contre courant à partir de l'équation :

$$Q = U.A.\Delta T_{lm} \qquad \text{(II.6)}$$

Avec :

Q : quantité de chaleur [KJ]

U : coefficient global d'échange thermique [KJ/m^2.K]

A : aire de la surface d'échange

ΔT_{lm}: température logarithmique moyenne

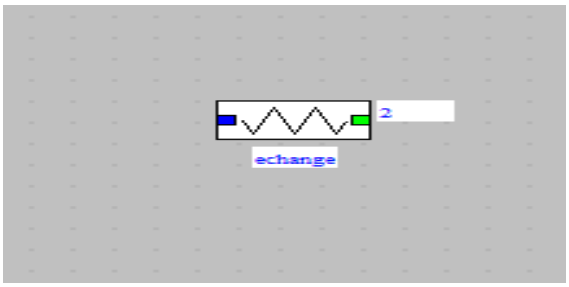


Figure II.3. : Représentation du modèle échangeur

Les spécifications à fournir sont :

- l'identification des cotes froide et chaude

- le sens d'écoulement (Co-courant ou contre courant)

Et une valeur parmi les suivantes :

- température du flux sortant du coté chaud
- température du flux sortant du coté froid
- quantité de chaleur échangée
- aire de surface d'échange
- température d'approche du coté flux chaud sortant
- température d'approche du coté flux froid sortant
- degrés de sous refroidissement du flux chaud sortant
- degrés de surchauffe du flux froid sortant
- diminution de la température du flux chaud
- coefficient de transfert de chaleur

En option, on peut spécifier, pour chaque coté de l'échangeur, des options de calcul des propriétés différents, des calculs d'équilibre entre phases pour chaque coté de l'échangeur, ainsi que les pressions ou les pertes de charge.

II.8.2 modèle de compresseur :

Le modèle compresseur permet de modéliser un compresseur à un étage de compression.

Ce modèle admet, en entrée un flux de matée et, éventuellement, un nombre quelconque de flux de travail, et en sortie un flux de matière, éventuellement, un flux de travail.

Nous devons spécifier le type de compresseur :

- poly tropique
- a déplacement positif
- isentropique

Et la pression de refoulement ou la puissance mécanique requise.

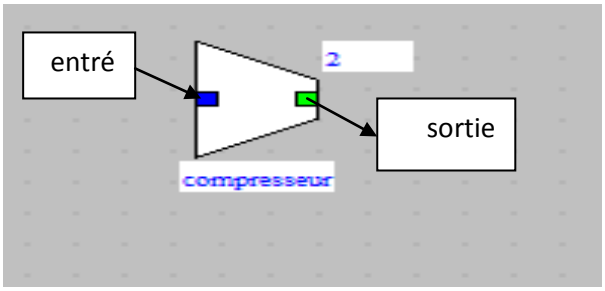


Figure II.4 : Représentation du modèle compresseur

II.8.3 modèle d'échangeur de chaleur refroidisseur :

Le modèle refroidisseur est un modèle simple permettant d'ajuster la température et ou la pression d'un flux. Il peut donc modéliser très simplement un échangeur de chaleur, une pompe ou un compresseur. Il admet un nombre quelconque de flux d'entrée et sort un flux (avec possibilité de décantation d'eau). La figure suivante représente ce modèle.

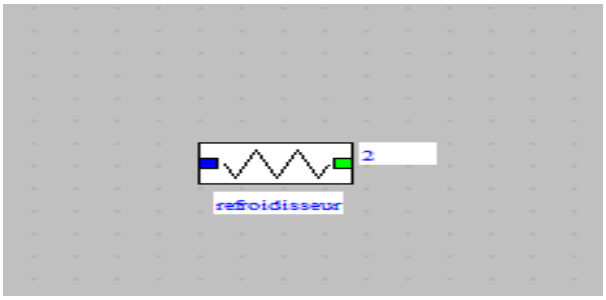


Figure II.5 : Représentation du modèle refroidisseur :

Pour un calcul di ou tri phasique il faut fournir les données suivantes :

- la pression et une quantité parmi :
- la température
- la variation de température
- le degré de surchauffe
- le degré de sous refroidissement
- la fraction vapeur
- la quantité de chaleur

Ou :

- la température (ou la variation de température) et une quantité parmi :
- la pression
- la fraction vapeur
- la quantité de chaleur

Pour un calcul monophasique, il faut préciser :

- la pression et une quantité fournir
- la température
- la variation de température
- la quantité de chaleur

II.8.4 modèle de séparateur :

Le modèle séparateur permet de modéliser une unité de séparation mono-étagée diphasique. Il admet un nombre quelconque de flux d'entrée (matière et chaleur) qu'il sépare en deux flux

de matière : un flux vapeur et un flux liquide et éventuellement un flux de chaleur. Il est également possible de décanter l'eau. La figure suivante représente le modèle séparateur.

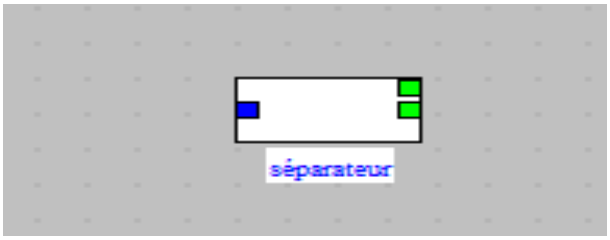


Figure II.6 : Représentation du modèle séparateur.

il faut spécifier deux quantité parmi les suivantes :

- température
- pression (ou perte de charge)
- fraction vapeur
- quantité de chaleur échangée

Remarque :

Le couple fraction vapeur quantité de chaleur échangée n'est pas permis.

II.8.5 modèle de diviseur :

Le modèle diviseur permet de modéliser une unité de séparation division de flux. Il admet un nombre quelconque de flux d'entrée (matière et chaleur) qu'il sépare en un nombre quelconque. La figure suivante représente le modèle diviseur.

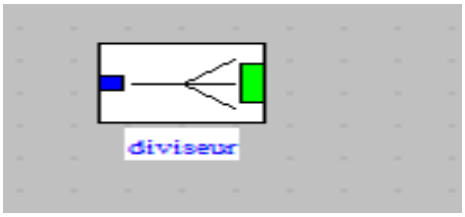


Figure II.7 : Représentation du modèle diviseur

Il faut spécifier un paramètre du débit qui quitte le diviseur parmi les :

- fraction divisée
- débit (massique ou molaire)
- débit volumique réelle
- limite du flux
- limite de volume du flux

- limite cumulative du flux
- limite de volume du débit cumulatif
- fraction résiduelle

II.8.6 modèle de mélangeur :

Le modèle mélangeur permet de modéliser une unité de mélange de flux. Il combine un ou plusieurs flux de matières (ou flux de chaleur ou de travail) en un seul flux. Le mélangeur ne peut pas mélanger les flux de différents types (matériel, la chaleur, travail). La figure suivante représente le modèle mélangeur.

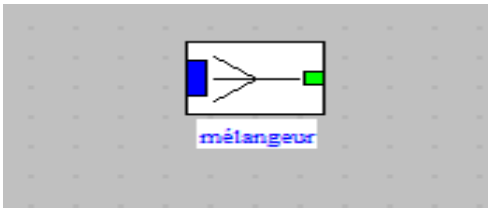


Figure II.8 : Représentation du modèle mélangeur

Remarque :

Ce bloc n'exigence pas une spécification pour simulé.

II.8.7 modèle de turbine :

Le modèle turbine permet de modéliser une unité pour réaliser elle est représenté sur la figure c'est après. La spécification du module de TURBINE est simple il suffit de sélectionné la valeur de la pression de refoulement ou la valeur de la perte de charge. Note que l'écoulement est adiabatique.

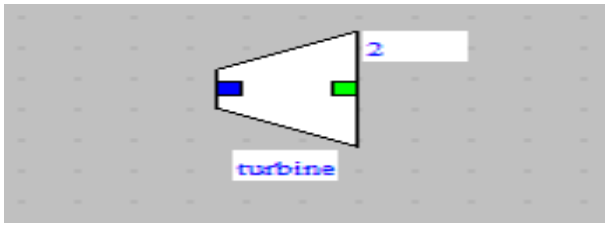


Figure II.9 : Représentation du modèle TURBINE

II.9 Les étapes de simulation des cycles étudie :

1- Construction du schéma de procédé (le cycle de liquéfaction de Linde)

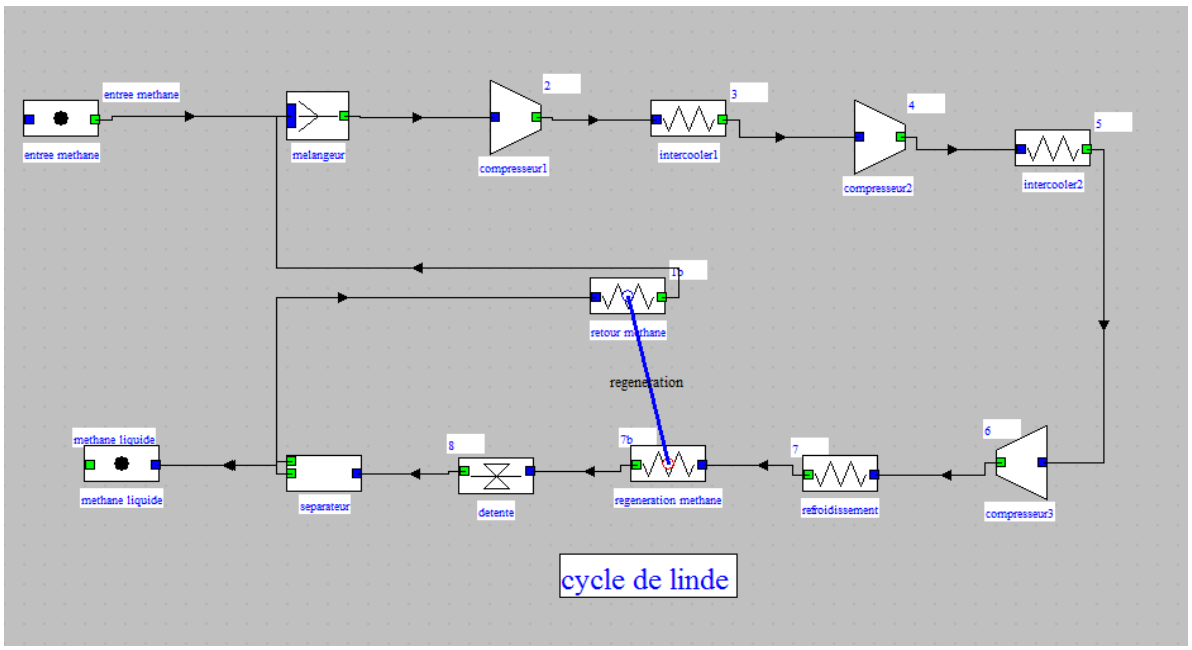


Figure II.10: schéma cycle de Linde.

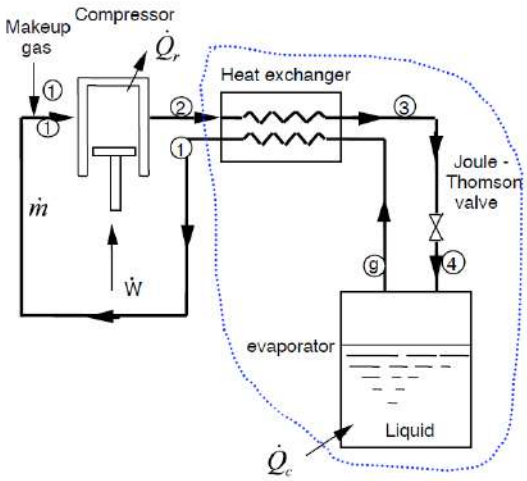


Figure II.10(a) : représentation schématique de processus simple de Linde

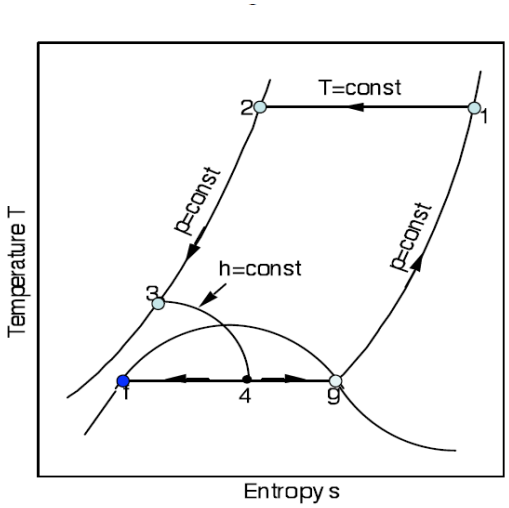


Figure II.10(b) : Diagramme T-S de Processus simple de Linde

Paramètre de performance :

Travail nécessaire de la compression de gaz comprimé (kJ/kg) :

Bilan énergétique :

$$\sum flux\ entrants = \sum flux\ sortants$$

Avec :

m =1kg

$$\dot{mh_1} + w_c = mh_2 + Q_R$$

$$dQ = TdS$$

$$Q_R = T_0(s_1 - s_2)$$

$$w_c = (h_2 - h_1) + t_0(s_1 - s_2)$$

$$w_c = (h_2 - h_1) - t_0(s_2 - s_1)$$

- **Taux de liquéfaction :**

$$y = \frac{m_f}{m} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f}$$

Travail de compression par unité de gaz liquéfié [kj/kg] :

$$\boldsymbol{\frac{w_c}{y} = (h_f - h_1) - \frac{t_0(s_2 - s_1)}{y}}$$

2-Construction du schéma de procédé (le cycle de liquéfaction de Claude)

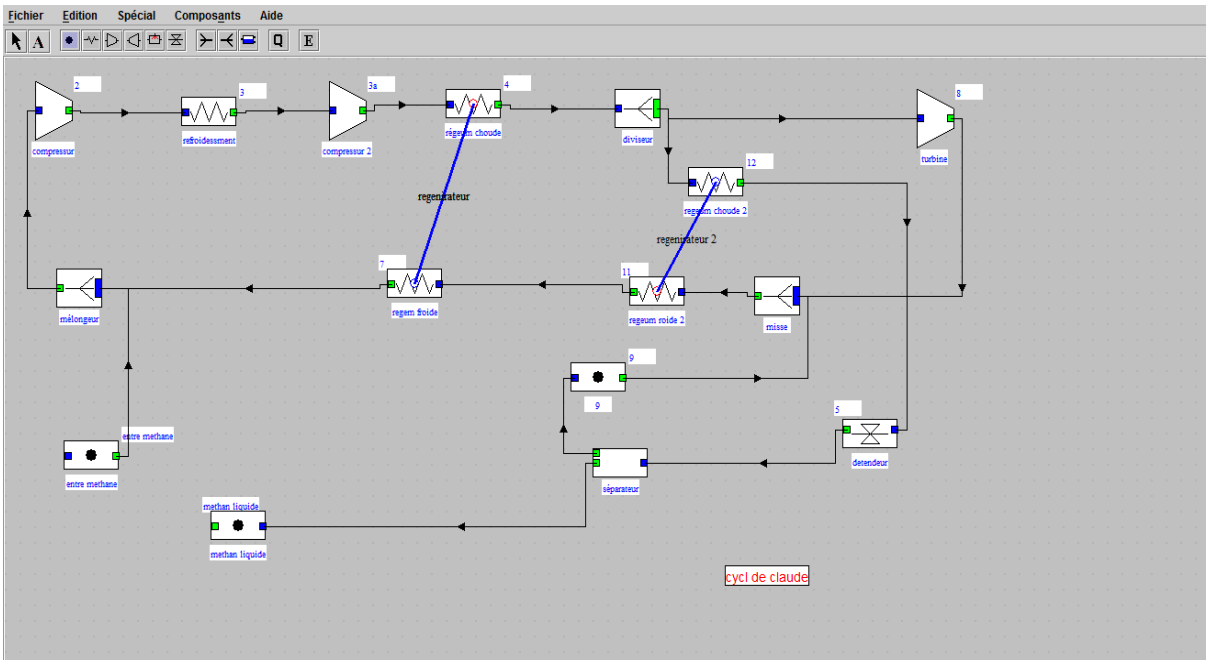


Figure II.11: schéma cycle de Claude.

Le schéma ci-dessus à thermoptim montre les différents composants et les courants de matière nécessaires pour amener la liquéfaction de l'air. Il se compose d'un compresseur, un refroidisseur, un échangeur de chaleur à contre-courant, une vanne J-T isenthalpique, un séparateur qui exécute des opérations de flash, un diviseur qui prend en charge des problèmes de convergence de masse et un mélangeur. Ces composants ou les équipements sont désignées comme des blocs dans le langage thermoptim.

2- Une fois le schéma de procédé complet, on indique les constituants en présence, pour notre étude c'est **l'air**.

3- Puis on fait choisir la méthode thermodynamique qui permet de calculer les propriétés physiques (propriétés thermodynamiques et propriétés de transport)

- ✓ la température (T1= 298K)
- ✓ la pression P1 (P1= 1 atm, soit 1.013 bar)
- ✓ le débit massique du gaz à liquéfiée notée (m = 2Kg/s)
- ✓ la fraction massique : AIR=1

5- par la suite, on précise les données à chaque composant de cycle suivant les cas :

- ✓ 1ier cas : la variation de la température à l'entrée de turbine de 293k à 313k pour des pressions de refoulement variant de 60atm à 80atm tout en fixant la fraction détournée vers turbine (0,65).
- ✓ 2éme cas : la variation de la fraction détournée vers l'expansion de 0,4à 0,8 pour despressions de refoulement variant de 60atm à 80atm tout en fixant la température àl'entrée de turbine (298k).

6- Les deux cas citée précédemment seront fait pour :

a. Rendement de compresseur et de turbine égale à 100%

b. Rendement de compresseur égale à 35% et rendement de turbine égale à 65%

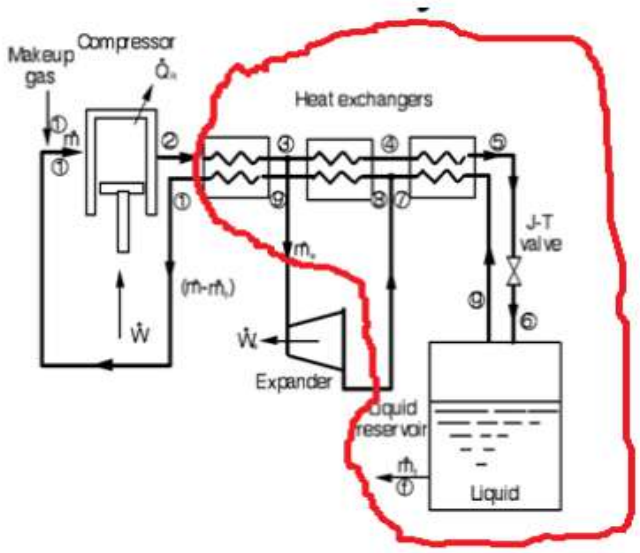


Figure II.12(a) : représentation schématique de processus simple de Claude

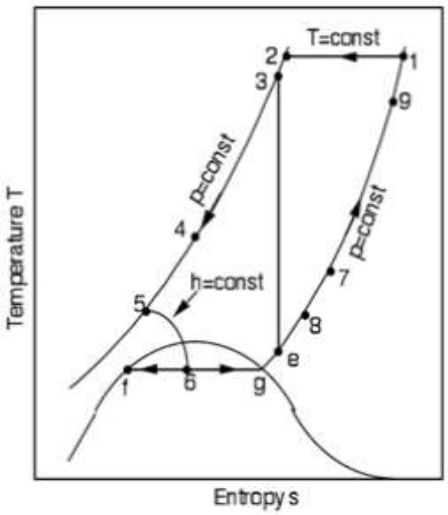


Figure II.12(b) : Diagramme T-S de processus simple de Claude

II.9.2 Les paramètres tirés à partir des résultats :

D'après les résultats qui donnent thermoptime on tire les paramètres suivants :

a) L'enthalpie h1 [kj/kg] à l'entrée du compresseur,
b) L'enthalpie h3 [kj/kg] à la sortie du refroidisseur,
c) L'enthalpie h4 [kj/kg] à l'entrée turbine,
d) L'enthalpie h8 [kj/kg] à la sortie turbine,
e) L'enthalpie hL [kj/kg] du liquide saturé à la pression atmosphérique,

f) L'enthalpie h11 [kj/kg] de la vapeur saturée à la pression atmosphérique,

g) Le travail net du compresseur [KJ],

h) Le travail généré par turbine [KJ],

II.9.3 Les paramètres à calculer :

❖ **Taux de liquéfaction :**

Bilan énergétique :

$$h_2 + m_e h_e = (m - m_f)h_1 + m_e h_3 + m_f h_f$$

$$m(h_2 - h_1) + m_e(h_e - h_3) = m_f(h_f - h_1)$$

$$m_f = \frac{m(h_2 - h_1) + m_e(h_e - h_3)}{m_f(h_f - h_1)}$$

$$y = \frac{m_f}{m} = \frac{h_2 - h_1}{h_f - h_1} + x\ \frac{h_2 - h_3}{h_f - h_1}$$

Avec :

X= $\frac{m_e}{m}$

II.9.3.1 Le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée (W/m [Kj/Kg]) :

$$w_{net} = w_c + w_t$$

❖ Travail de compresseur :

$$w_c = (h_2 - h_1) - t_0(s_2 - s_1)$$

Avec

❖ En appliquant la 1ier loi de la thermodynamique pour turbine uniquement :

$w_t = m_e(h_e - h_3)$

Avec :

W_t : C'est le travail fourni par turbine [Kj]

m_e: La masse du gaz qui passe par turbine [Kg]

h_e : L'enthalpie à l'entrée de turbine [Kj/Kg]

h_3 : L'enthalpie à la sortie de turbine [Kj/Kg]

$w_{net} = (h_2 - h_1) - t_0(s_2 - s_1) + m_e(h_e - h_3)$

Avec

W_{net} : le travail net fourni ou absorbé par le système

h_1 : L'enthalpie à l'entrée de compresseur [Kj/Kg]

h_2 : L'enthalpie à la sortie du compresseur [Kj/Kg]

Si le travail produit par la détente est utilisé pour aider à la compression, le travail nécessaire pour l'unité de masse du gaz comprimée est donné par :

$$\frac{W}{y} = \frac{(h_2 - h_1) - t_0(s_2 - s_1) + m_e(h_e - h_3)}{y}$$

T_1 : Température à l'entrée du compresseur [K]

S_1 : L'entropie à l'entrée du compresseur [Kj/Kg.K]

S_3 : L'entropie à la sortie du refroidisseur [Kj/Kg.K]

h_e: L'enthalpie réelle à la sortie de turbine [kj/Kg]

Le tableau II.1 suivant donne le travail idéal de certains gaz à T=300 [K] et P= 101.3 [KPa]

GAZ	Température d'ébullition en [K]	le travail idéal de liquéfaction $-W_i/m_f$ [Kj/Kg]
Hélium3	3.19	8178
Hélium4	4.21	6819
Hydrogène H_2	20.27	12019
Néon N_e	27.09	1335
Azote N_2	77.36	768.1
Air	78.8	738.9
Argon A_r	87.28	478.6
Oxygène O_2	90.18	635.6

Chapitre III

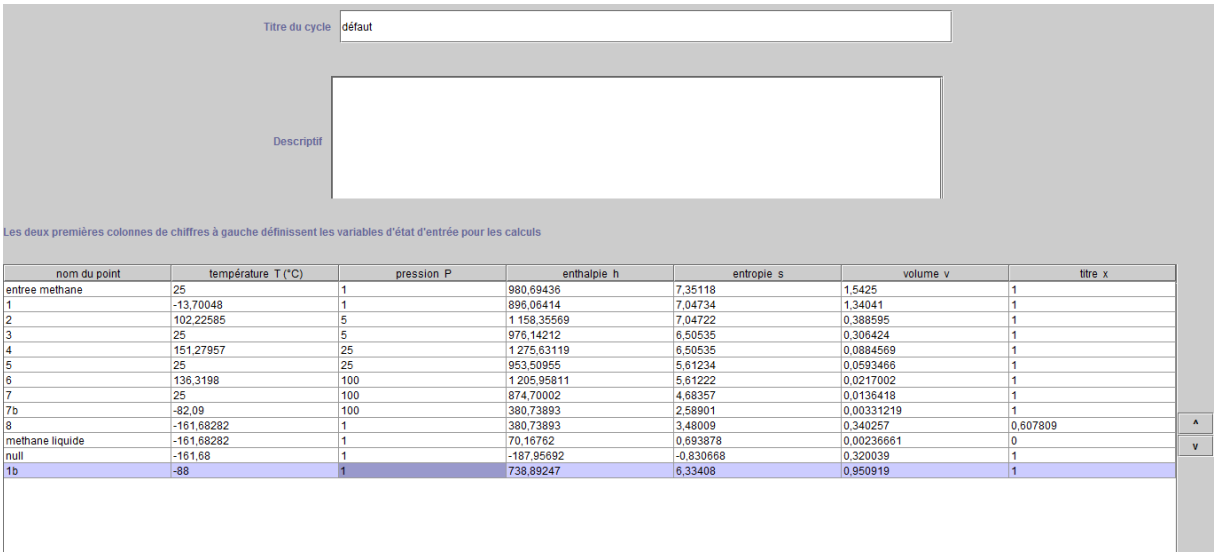
Résultats et discutions

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre les résultats obtenus sont représentées respectivement pour les deux cas cités précédemment avec des variations de valeurs des rendements de compresseur et de turbine pour chacun des cas.

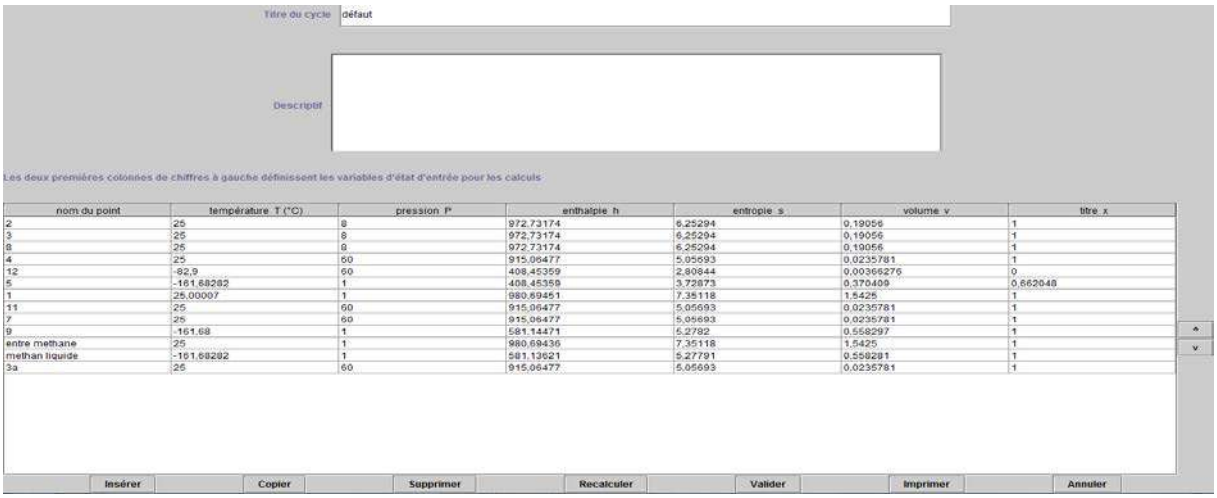
On examine d'abord l'effet de la température à l'entrée de turbine sur le taux de liquéfaction, ensuite on analyse la sensibilité de ce taux à la pression de refoulement du compresseur et à la fraction de l'air passant dans turbine.

Enfin, une optimisation est faite pour choisir les valeurs des paramètres étudiés qui Conduisent à une meilleure performance du cycle



nom du point	température T (°C)	pression P	enthalpie h	entropie s	volume v	titre x
entree methane	25	1	980,69436	7,35118	1,5425	1
1	-13,70048	1	896,06414	7,04734	1,34041	1
2	102,22585	5	1 158,35569	7,04722	0,388595	1
3	25	5	976,14212	6,50535	0,306424	1
4	151,27957	25	1 275,63119	6,50535	0,0884569	1
5	25	25	953,50955	5,61234	0,0593466	1
6	136,3198	100	1 205,95811	5,61222	0,0217002	1
7	25	100	874,70002	4,68357	0,0136418	1
7b	-82,09	100	380,73893	2,58901	0,00331219	1
8	-161,68282	1	380,73893	3,48009	0,340257	0,607809
methane liquide	-161,68282	1	70,16762	0,693878	0,00236661	0
null	-161,68	1	-187,95692	-0,830668	0,320039	1
1b	-88	1	738,89247	6,33408	0,950919	1

Figure III-1 : Rapport succès de la simulation de Linde.



nom du point	température T (°C)	pression P	enthalpie h	entropie s	volume v	titre x
2	25	8	972,73174	6,25294	0,19056	1
3	25	8	972,73174	6,25294	0,19056	1
8	25	8	972,73174	6,25294	0,19056	1
4	25	60	915,06477	5,05693	0,0235781	1
12	-82,9	60	408,45359	2,80844	0,00366276	0
5	-161,68282	1	408,45359	3,72873	0,370409	0,662048
1	25,00007	1	980,69451	7,35118	1,5425	1
11	25	60	915,06477	5,05693	0,0235781	1
7	25	60	915,06477	5,05693	0,0235781	1
9	-161,68	1	581,14471	5,2782	0,558297	1
entre methane	25	1	980,69436	7,35118	1,5425	1
methan liquide	-161,68282	1	581,13621	5,27791	0,558281	1
3a	25	60	915,06477	5,05693	0,0235781	1

III.2.comparaison les cycles de liquéfaction (Claude et Linde) :

Le rôle de la turbine est double :

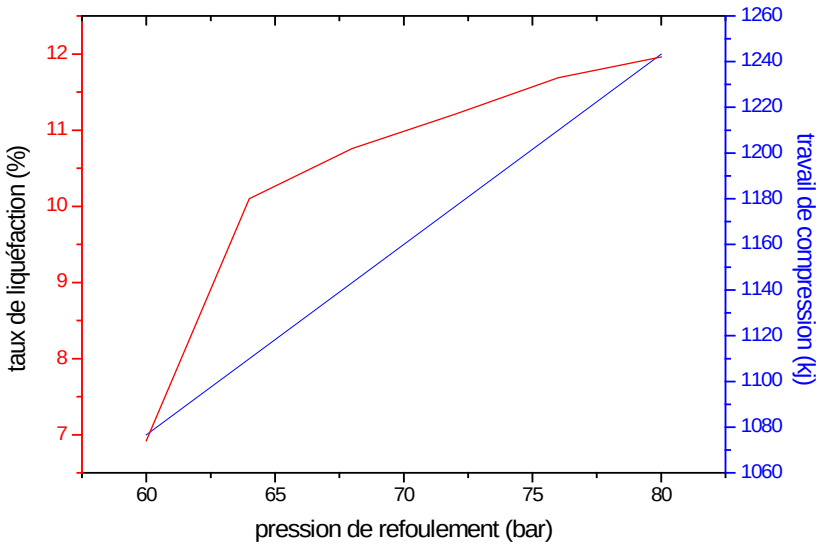
- refroidir refoulement (frottement) le gaz avant sa détente dans la vanne de joule-Thomson
- fournir un travail si récupérer, va diminuer le travail de compression.

cycles / paramètre	Linde	Claude
m_f	1.3	0,188
$y = \frac{m_f}{m}$	0,02	0,07
w_c [kj/kg]	1216	1074
$\frac{w}{y}$ [kj/kg]	60839	15342

III.3.1. L'effet de la pression de refoulement (p_2)à la sortie du compresseur :

La figure III.1 montre, ce qui est physiquement évident, une augmentation de la fraction de liquide obtenue avec l'augmentation de la pression de compression Puisque chaque fois qu'on augmente la pression

Lorsque nous augmentons la pression le taux de liquéfaction et le travail de compression augmentent.



La figure III.1variation de taux de liquéfaction et travail de compression en fonction de pression refoulement.

III.2.2. L'effet de la température d'entrée à turbine :

La figure III.2 représente la variation du taux de liquéfaction et le travail de compression en fonction de la température à l'entrée de turbine pour différents valeurs de pression à la sortie de compresseur. Comme le montre la figure, une augmentation de T4 entraine une amélioration de la fraction de gaz turbine.

Par ailleurs, on constate que pour chaque courbe de pression il existe deux limites de température. La première, valeur minimale, correspondant à la limite technologique de turbine afin d'éviter les détentes humides et la deuxième, valeur maximale, correspondant à la température de début de liquéfaction (zone de mélange).

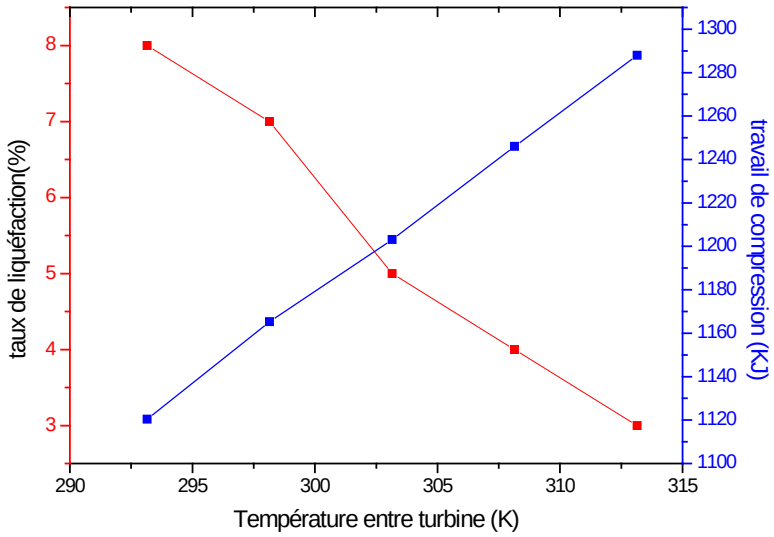
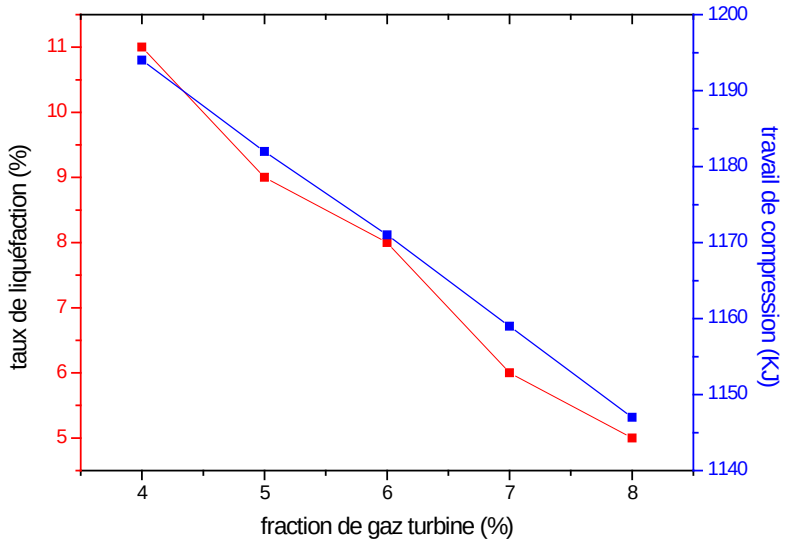


Figure III-2 : Variation de taux de liquéfaction (%) et le travail de compression (KJ) en fonction de la température de gaz à l'entrée de turbine

III.2.3. Effet de la fraction de gaz passant par turbine :

On remarque dans les figures III.3.que la fraction liquéfiée augmente avec l'augmentation de la fraction de l'air passant dans turbine (directement proportionnelle). Ce s'explique par l'accroissement de l'énergie de flux dont le rôle est de refroidir le flux 5-6 engendrant ainsi un

abaissement de la température T6 Le travail de compression se voit ainsi diminuer vu l'augmentation du travail récupéré par turbine.



La figure III.3variation de taux de liquéfaction et travail de compression en fonction de fraction de gaz de turbine.

Conclusion

La simulation du procédé liquéfaction de l'air a été faite avec succès en utilisant l'outil de simulation thermoptim. Le cycle de Claude a été adopté vu les nombreux avantages qu'il présente. En outre, l'effet de la variation des différents paramètres de fonctionnement sur la performance du cycle a été analysé.

Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de température et de la fraction de l'air passant dans la turbine se traduisent par une augmentation de la fraction liquéfiée et une diminution de la consommation énergétique nécessaire et donc une amélioration de la performance du cycle.

Quant à la pression à la sortie du compresseur, les résultats de simulation ont montré qu'une valeur de 40 atm est suffisante pour produire de l'air liquide avec un travail minimal et un rendement maximal. Par ailleurs, le recours à la compression étagée peut diminuer considérablement le coût de production.

Dans cette étude, l'analyse de comparaison des cycles Claude et Linde n'ont pas été considérés. Donc, comme une future recommandation, l'analyse de comparaison peut être faite, ce qui conduit à l'optimisation de l'ensemble du processus.

En outre, la simulation des cycles de liquéfaction beaucoup plus complexes peuvent être considérées comme ceux produisant l'argon, avec de l'oxygène et l'azote. On peut également incorporer des fonctions définies par l'utilisateur qui aide et améliore la résolution des problèmes réels de simulation.

Enfin, les progrès ne cessent de croitre dans ce domaine, grasse à la disponibilité de l'air trouver en abondance dans notre atmosphère, et la très forte demande de l'air liquide par l'humanité pour répondre à ces différents besoin qui ce développe chaque jours, et qui ouvre l'appétit pour dérouler plus des recherches.

B I B L I O G R A P H I E

[1]- Mamata Mukhopadhyay « Fundamentals Of Cryogenic Engineering», édition Prentice Hall of India (PHI) Learning, 2010, New Delhi.

[2]- K.D. Timmerhaus, R. Reed « Cryogenic Engineering - Fifty years of progress», édition Springer, 2007, New York.

[3]- Pierre PETIT «Séparation et liquéfaction des gaz (J 3 600) », collection techniques de l'ingénieur, 2008, paris, 21pages.

[4]- W.F. Castle «Air separation and liquefaction: recent developments and prospects for the beginning of the new millennium», l'Institut International du Froid, Commission A2, 2002, paris.

[5]- Barron Randall F « Cryogenic Systems », édition Oxford University Press, 1985, New York.

[6]- The LINDE groupe «Cryogenic Air Separation History and Technological Progress», 2010, Pullach Germany.

[7]- Linde H «Aus der Geschichte der Tieftemperaturtechnik », édition Luft- Und Käel technik, 1999/1995.

[8]- Ahmadul Ameen «Refrigeration and Air Conditioning», édition Prentice Hall of India (PHI) Learning, 2006, New Delhi.

[9]- Ramesh Chandra Arora «Refrigeration and Air Conditioning», édition Prentice Hall of India (PHI) Learning, 2010, New Delhi.

[10]- Pradeep Ahuja «Chemical Engineering Thermodynamics», édition Prentice Hall of India (PHI) Learning, 2009, New Delhi.

[11]- Thomas O'Conor Sloane « Liquid Air and the Liquefaction of Gases», édition Adamant Media Corporation, 2002, New York.

[12]- James Alfred Ewing « Thermodynamics for Engineers 2ed», Cambridge University Press (CPU), 1946, Cambridge.

[13]- Bernard HÉBRAL «Cryogénie (b 2380a) », collection techniques de l'ingénieur, 2008, Paris.

[14]- ALEXANDRE C. DIMIAN «Integrated design and simulation of chemical processes», University of Amsterdam, 2003, Amsterdam.

[15]- livre en line Le froid et ses applications dans l'industrie du gaz – collection des techniques gazières et association technique de l'industrie du gaz en France.

[16]- Jean-Marc AMANN «Etude de procédés de captage du CO2 dans les centrales thermiques», l'Ecole des Mines de Paris, 2007, Paris.

[17]- Benjamin BRADU « Modélisation, simulation et contrôle des installations cryogéniques du CERN», Université PARIS-SUD 11, 2010, Paris.

[18]- ABHIJIT DALAI «Nitrogen and helium liquefier design and simulation using aspen plus», National Institute of Technology, 2011, Rourkela.

[19]- Richard T Jacobsen, Steven G. Penoncello and Eric W. Lemmon «Thermodynamic Properties of Cryogenic Fluids», PLENUM PRESS, 1997, New York and London.

[19] : Air separation techniques course by Anders Lenneskog, Cryogenic plants. Version 8 June 2007.

[20]- mémoire de fin d'étude « Simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène » réalisé par : Djelloul amel-2006.

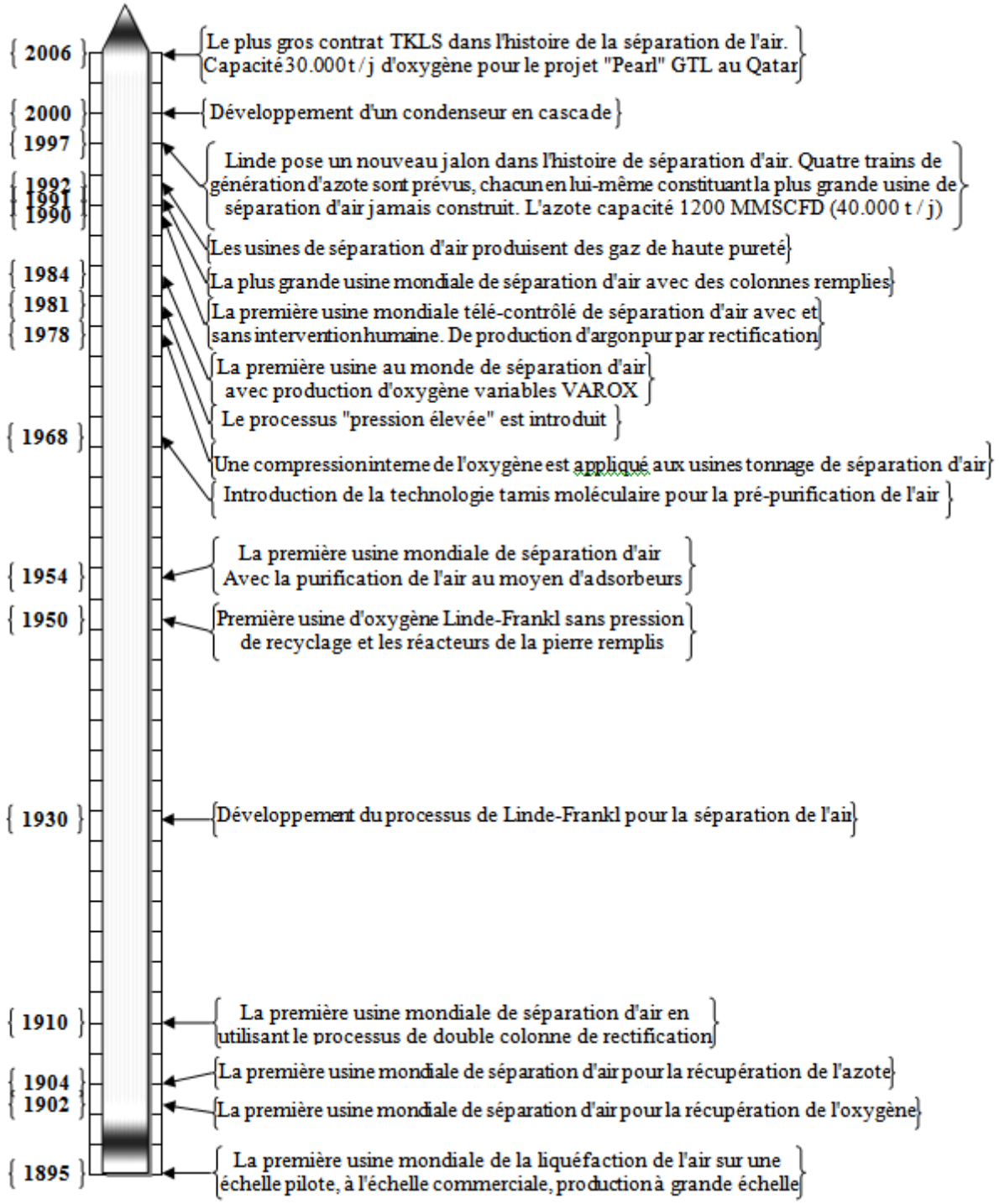
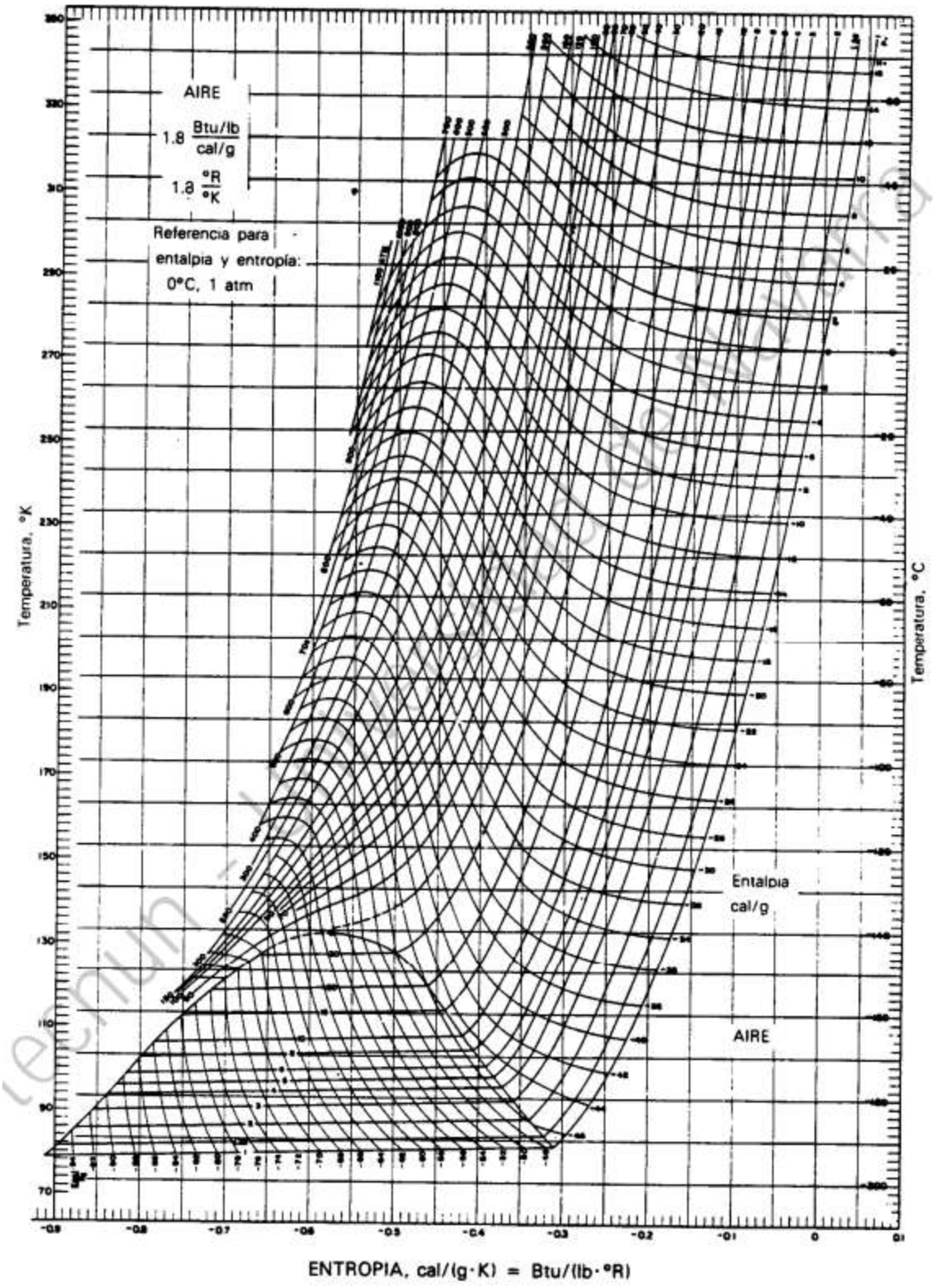


Figure I.4: Le développement de séparation d'air depuis 1895 à 2006


AIRE
1.8 Btu/lb / cal/g
1.8 °R / °K
Referencia para entalpia y entropía: 0°C, 1 atm
Temperatura, °K
Temperatura, °C
Entalpia cal/g
AIRE
ENTROPIA, cal/(g·K) = Btu/(lb·°R)