

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CLIMATIQUE

N° d'ordre :.....

Série :.....

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MAGISTER  
EN GÉNIE CLIMATIQUE

OPTION

THERMIQUE DU BÂTIMENT ET RÉFRIGÉRATION

**SIMULATION DE CYCLE DE CLAUDE POUR LA LIQUÉFACTION  
DE L'AIR, DE L'AZOTE ET DE L'OXYGÈNE**

Par : DJELLOUL AMEL

SOUTENUE LE : 28 / 11 / 2006

Devant le jury d'examen :

Président : A .BELHAMRI  
Rapporteur : M.BOUMAAZA  
Co.rapporteur : A. KAABI  
Examineur : M.KADJA  
Examineur : Y.KHATIB

Prof. Univ .MENTOURI Constantine  
Prof. Univ .MENTOURI Constantine  
Prof. Univ .MENTOURI Constantine  
Prof. Univ .MENTOURI Constantine  
Mc . Univ .MENTOURI Constantine

## REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier Monsieur M.BOUMAAZA, professeur au département de génie climatique, université de Constantine pour son aide, pour ses orientations et pour ses remarques constructives.

Je remercie vivement, Monsieur A.KAABI, professeur au département de génie climatique, université de Constantine, mon co-rapporteur pour son compréhension, ses conseils scientifiques efficaces.

J'adresse mes respectueux remerciements à Monsieur A.BELHAMRI, professeur au département de génie climatique, université de Constantine, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je tiens à remercier Monsieur M.KADJA, professeur au département de génie mécanique, université de Constantine, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être membre de ce jury.

Je t'émoiné également ma reconnaissance à Monsieur Y.KHATIB, Docteur au département de génie climatique, université de Constantine, pour sa participation à mon jury de soutenance.

Je voue une gratitude particulière à mon enseignant H.SLIMANI pour ses encouragements et ses conseils.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance aux enseignants de l'université de Batna, en particulier Monsieur G.MEBARKI, Monsieur N.LAHBARI , Monsieur M.BOUDOUH, mon collègue Mourad et aux enseignants de l'université de BAB-EL- ZOUAR (Alger), département de cryogénie pour leurs nombreux services.

Je remercie également mon mari et mes filles avec lesquels j'ai partagé le meilleur et le pire lors de l'élaboration de ce travail.

## SOMMAIRE

### CHAPITRE 01 INTRODUCTION

1.1 Introduction à la cryogénie .....	1
1.2 Objet du thème .....	2
1.3 Présentation du mémoire .....	2

### CHAPITRE 02 NOTIONS DE CRYOGENIE

2.1 Historique et domaine d'utilisation de la cryogénie .....	3
2.2 Propriétés physiques aux basses températures .....	6
2.2.1 Propriétés des fluides cryogéniques.....	6
2.2.2 Propriétés des matériaux.....	7
2.2.2.1 Propriétés thermiques .....	7
2.2.2.2 Propriétés mécaniques .....	10
2.3 Transferts thermiques.....	10
2.3.1 Conduction .....	11
2.3.2 Convection .....	11
2.3.3 Rayonnement .....	11
2.4 Stockage et transfert des fluides cryogéniques.....	12
2.4.1 Isolation des vases de stockage.....	12
2.4.2 Les différents types d'isolants .....	13
2.4.3 Lignes de transfert .....	14
2.4.4 Cryostats .....	14

### CHAPITRE 03 CYCLES DE LIQUEFACTION

3.1 Définition de la Réfrigération et de la liquéfaction .....	15
3.2 Importance et utilisation des gaz liquéfiés .....	15
3.3 Comment réaliser la liquéfaction des gaz.....	16
3.4 Différents types de systèmes de liquéfaction .....	17
3.4.1 Cycle idéal de liquéfaction .....	17
3.4.2 Cycles pratiques .....	20
3.4.2.1 Cycles à échange ou à flux continu .....	20
3.4.2.2 Cycles à régénérateurs ou à flux alternés.....	23
3.4.2.3 Cycles magnétiques .....	23
3.5 Equipements utilisés .....	24
3.5.1 Compresseurs cryogéniques .....	24

3.5.2 Les échangeurs .....	25
3.5.3 Les régénérateurs .....	25
3.5.4 Les machines de détente cryogénique .....	25
3.5.5 Autres composants .....	26
3.6 Performances des cycles de liquéfaction .....	26

## **CHAPITRE 04 CYCLE DE CLAUDE POUR LA LIQUEFACTION DE L' AIR**

4.1 Historique et développement du cycle de Claude.....	28
4.2 Séparation de l'air .....	28
4.2.1 Aspiration et compression de l'air ambiant .....	28
4.2.2 Epuration de l'air .....	29
4.2.3 Refroidissement .....	29
4.2.4 Liquéfaction .....	29
4.2.5 Distillation .....	29
4.3 Principe de cycle de Claude .....	30
4.4 Production de basses températures .....	32
4.4.1 Effet de joule- Thompson .....	32
4.4.2 Détente adiabatique .....	33
4.5 L'air .....	34
4.5.1 Propriétés de l'air .....	34
4.5.2 Propriétés et utilisations pratiques de l'azote et l'oxygène .....	36

## **CHAPITRE 05 MODELE DE SIMULATION DE CYCLE DE CLAUDE POUR LA LIQUEFACTION DE L' AIR, DE L' AZOTE ET DE L' OXYGENE**

5.1 Paramètres d'opération de cycle de Claude .....	39
5.2 Paramètres de performance d'un système de liquéfaction .....	39
5.3 Paramètres qui influent sur la performance du cycle .....	39
5.4 Calcul thermodynamique .....	40
5.4.1 Les paramètres connus (donnés).....	40
5.4.2 Les paramètres tirés à partir des diagrammes .....	41
5.4.3 Les paramètres à calculer .....	41
5.4.3.1 Les enthalpies .....	41
5.4.3.2 Les entropies.....	42
5.4.3.3 Le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée.....	43
5.4.3.4 La fraction Y du gaz liquéfiée .....	44
5.4.3.5 Le travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée.....	45
5.4.3.6 Le rendement thermodynamique FOM .....	45
5.4.3.7 Les rendements des composants du système.....	46
5.5 Algorithme et Organigramme de calcul .....	50

## CHAPITRE 06

## RESULTATS ET DISCUSSION

6.1 Présentation des résultats .....	52
6.1.1 L'effet de la pression du gaz à la sortie du compresseur et de la température du gaz à l'entrée de l'expandeur sur les paramètres de performance.....	52
6.1.2 L'effet de la pression du gaz à la sortie du compresseur et de la fraction du gaz passant par l'expandeur sur les paramètres de performance .....	55
6.2 Discussion des résultats .....	95
6.3 Comparaison des résultats .....	96
Conclusion et recommandations .....	98

### Références bibliographiques

- Annexe 1 Principales propriétés des fluides cryogéniques
- Annexe 2 Diagrammes T-S de l'air, de l'azote et de l'oxygène.

## LISTE DES FIGURES

2.1 Echelle de température thermodynamique.....	4
2.2 Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs.....	5
3.1.a Diagramme T-S d'un cycle idéal de liquéfaction.....	18
3.1.b Schéma de principe d'un cycle idéal de liquéfaction .....	18
3.2 Cycles réversibles (cycles de CARNOT, STIRLING et ERICSSON).....	19
3.3 Cycles d' ERICSSON, SIEMENS et de BRAYTON.....	19
3.4.a Diagramme T-S de Cycle de JOULE THOMSON.....	21
3.4.b Schéma de principe de Cycle de JOULE THOMSON.....	21
3.5.a Diagramme T-S de Cycle de BRAYTON .....	22
3.5.b Schéma de principe de Cycle de BRAYTON.....	22
3.6.a Diagramme T-S de Cycle de CLAUDE.....	22
3.6.b Schéma de principe de Cycle de CLAUDE.....	22
4.1 Schéma de principe de cycle de CLAUDE.....	31
4.2 Diagramme T-S de Cycle de CLAUDE .....	31
6.1 Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée ( $w/m_f$ ) En fonction de la température $T_3$ du gaz à l'entrée de l'expandeur.....	59
6.2 Profils de variation de la fraction $y$ du gaz liquéfiée en fonction de la température $T_3$ du gaz à l'entrée de l'expandeur.....	65
6.3 Profils de variation du rendement thermodynamique <i>FOM</i> en fonction de la température $T_3$ du gaz à l'entrée de l'expandeur.....	71
6.4 Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée ( $w/m_f$ ) en fonction de la fraction $x$ passant par l'expandeur.....	77
6.5 Profils de variation de la fraction $y$ du gaz liquéfiée en fonction de la fraction $x$ passant par l'expandeur.....	83
6.6 Profils de variation du rendement thermodynamique <i>FOM</i> en fonction de la Fraction $x$ passant par l'expandeur.....	89

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>4.1</b> conditions critiques des gaz permanents.....	35
<b>4.2</b> domaines d'utilisation des gaz industriels.....	38
<b>5.1</b> le travail idéal de certains gaz.....	46

## **ANNEXES**

Annexe 1	Principales propriétés des fluides cryogéniques
Annexe 2	Diagrammes T-S de l'air, de l'azote et de l'oxygène

## NOMENCLATURE

LETTRES LATINES NON INDICEES		
Symbole	Désignation	Unité
$C$	Compresseur	-
$C_p$	La chaleur spécifique du gaz à pression constante	[KJ/K.Kg]
$W_p$	Coefficient de performance	sans dimension
$E$	Échangeur thermique	-
$E_C$	Énergie cinétique	[KJ]
$E_p$	Énergie potentielle	[KJ]
$E_X$	Expandeur.	-
$FOM$	Rendement thermodynamique	sans dimension
$h$	Enthalpie spécifique	[KJ/Kg]
$H$	Enthalpie	[KJ]
$m$	Masse totale du gaz	[Kg]
$m_f$	Masse du gaz liquéfiée	[Kg]
$m_e$	Masse du gaz passant par l'expandeur	[Kg]
$M$	Masse molaire du gaz	[Kg/mole]
$P$	Pression	[MPa]
$P_c$	Pression critique	[MPa]
$R$	Constante des gaz parfaits	[KJ/K.Kmole]
$R_{cp}$	Rendement global du compresseur	[%]
$R_e$	Rendement de l'échangeur thermique	[%]
$R_{e_{cri}}$	Rendement critique de l'échangeur thermique	[%]
$R_{ex_{ad}}$	Rendement adiabatique de l'expandeur	[%]
$R_{ex_{MC}}$	Rendement mécanique de l'expandeur	[%]
$S$	Entropie	[KJ/K]
$s$	Entropie spécifique	[KJ /Kg.K]
$T$	Température du gaz	[K]
$U$	Energie interne	[KJ/Kg]
$(W/m)$	Le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée	[KJ/Kg]
$(W/m_f)$	Le travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée	[KJ/Kg]
$(W_e/m)$	Travail théorique	[KJ/Kg]
$W_e$	Travail de l'expandeur	[KJ]
$(W/m)_{sup}$	Travail Supplémentaire nécessaire au système	[KJ/Kg]
$X$	La fraction de la masse du gaz passant par l'expandeur par la masse totale.	sans dimension
$y$	La fraction de la masse du gaz liquéfiée par la masse totale.	sans dimension

<b>LETTRES LATINES INDICEES</b>		
<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$P_{2\min}$	Pression minimale à la sortie du compresseur	[MPa]
$P_{2\max}$	Pression maximale à la sortie du compresseur	[MPa]
$T_{3\min}$	Température minimale à l'entrée de l'expandeur	[K]
$T_{3\max}$	Température maximale à l'entrée de l'expandeur	[K]
$X_{\min}$	La fraction minimale du gaz passant par l'expandeur	sans dimension
$X_{\max}$	La fraction maximale du gaz passant par l'expandeur	sans dimension
$f$	Le liquide saturé à la pression atmosphérique.	-
$g$	La vapeur saturé à la pression atmosphérique	-

<b>LETTRES GRECS</b>		
<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$m_{j.T}$	Coefficient de Joule- Thomson	sans dimension
$m_s$	Coefficient de détente isentropique.	sans dimension

# **Chapitre 1**

## **Introduction**

---

## 1.1 Introduction à la cryogénie :

La cryogénie, science et technologie des températures inférieures à 120 K, a entamé son deuxième siècle d'existence [1]. Elle est le résultat d'une conjonction historique du progrès scientifique ( déplacement progressif de la thermodynamique au cours du XIXe siècle, de la théorie macroscopique de l'énergie de J Joule et S Carnot , à la mécanique statistique des particules microscopique de L Boltzmann et J W Gibbs ) et du progrès technologique ( poursuite de la liquéfaction des gaz atmosphériques jusque là considérés comme « non condensables » , faisant appel aux études des propriétés des substances chimiques pures et de leurs mélanges ,les appareils de compression , l'écoulement et les transferts de chaleur des fluides et les techniques d'isolation thermique ).

Les développements simultanés de la technologie et de la physique aux basses températures sont intimement liés à la « course » à la liquéfaction des gaz appelés « permanents » ; hydrogène, azote, oxygène..

L'hydrogène , malgré sa faible masse moléculaire, devenait un vecteur énergétique [2] courant –« l'économie de l'hydrogène » est souvent citée comme solution à l'augmentation de la consommation d'énergie et à la protection de l'environnement dans les pays industrialisés - l'hydrogène sous forme de liquide cryogénique aurait très certainement un rôle important à jouer , comme aujourd'hui dans les réservoirs des prototypes de voitures et de véhicules commerciaux équipés de moteurs à combustion interne ou de piles à combustible .

Parmi les secteurs qui passionnent le public, la conquête de l'espace représente une des grandes réalisations de ce siècle, ces développements ont été rendus possibles pour l'utilisation de l'oxygène et de l'hydrogène [3] stockés sous forme liquide, pour alimenter les moteurs fusés Grâce à la cryogénie, on peut produire à grande échelle de l'oxygène et de l'azote à partir de l'air. On peut utiliser l'oxygène de différentes façons, entre autres dans les moteurs de fusées, dans les chalumeaux pour couper et souder pour permettre la vie dans les vaisseaux spatiaux et la plongée sous- marine. L'azote est utilisé dans la fabrication de l'ammoniac contenu dans les engrais et dans le conditionnement des aliments congelés en les refroidissant rapidement afin d'éviter la destruction des tissus cellulaires [4].

La cryogénie a aussi rendu possible le transport commercial des gaz naturels Liquéfiés [5], sans la cryogénie la recherche nucléaire [6] manquerait d'hydrogène Et d'héliums liquides utilisés dans les détecteurs de particules,Les appareils à infrarouge, les masers et les la surs peuvent également utiliser les températures cryogéniques [7], [8].

Vu la diversité de domaines d'application des liquides cryogéniques, on doit donc être soucieux pour avoir une grande quantité des gaz liquéfiés consommant le minimum d'énergie.

## **1.2 Objet du thème :**

Dans les systèmes de liquéfaction des gaz, on rencontre un problème majeure c'est comment peut-t-on avoir le maximum du gaz liquéfié en fournissant le minimum du travail ? En quelque sorte, jouant sur quels paramètres pour pouvoir améliorer la performance de ces cycles ?

L'objectif, donc, de cette étude est la recherche de ces paramètres appliqués sur le cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, l'azote et l'oxygène pour obtenir une meilleure performance.

## **1.3 Présentation du mémoire :**

On a introduit dans la section précédente l'importance de la cryogénie qui est considérée comme clé de la science et de la technologie avancée et l'utilisation de ce procédé pour la transformation des gaz « permanents » qui constitue actuellement un des fondements essentiels de l'industrie moderne. L'amélioration de ce processus de transformation des gaz précisément leur liquéfaction c'est l'objectif visé de cette étude.

Un aperçu bref sur l'historique et le développement actuel de la cryogénie Sont donnés dans la première partie du deuxième chapitre, les fluides et les matériaux ont un comportement à basse température bien différent de ce lui à température ambiante ; la connaissance de ces comportement est donc indispensable, ainsi que les modes de transfert thermique et le stockage des fluides cryogéniques font l'objet des dernières parties du deuxième chapitre.

La théorie, le principe de fonctionnement des cycles de liquéfaction des gaz, ainsi que l'équipement utilisé constituent le contenu du troisième chapitre.

Le quatrième chapitre est consacré à L'historique de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air (schéma de principe et mode de fonctionnement), les différentes étapes de séparation de l'air , la composition de l'air ainsi que les domaines d'utilisation de ses composants font l'objet de la dernière partie de ce chapitre.

Basant sur des relations thermodynamiques et des équations de bilans de conservation de masse on a pu établir un modèle de simulation de cycle de Claude qui fait l'objet du cinquième chapitre. Dans le dernier chapitre, les résultats de la procédure numérique sont illustrés sous forme de graphes. Ces résultats sont discutés et comparés avec quelques résultats trouvés dans la littérature.

# **Chapitre 2**

## **Notions de Cryogénie**

## 2-1 Historique et domaine d'utilisation de la cryogénie :

Avoir de très basses températures, c'était l'objectif de grands nombres de chercheurs scientifiques et des physiciens. Commenant par la première liquéfaction de l'air (L.Cailletet et R.Picret 1877) [9],[10] et la première séparation de l'oxygène et de l'azote (K.Olszewski et S.Wroblewskis 1883 ) [11] furent rapidement suivies par la liquéfaction de l'hydrogène , rendu possible par l'invention d'un réservoir isolé sous vide avec écran de rayonnement (J.Dewar ,1898)[12],[13].

Ce pendant , ce fut la première liquéfaction de l'hélium (H.Kamerlingh Onnes ,1908) [14]qui ouvrit la voie de la recherche sur la matière condensée aux basses températures, un domaine qui est aujourd'hui encore un aspect majeur de la recherche et qui engendra la découverte de nouveaux phénomènes tels que la supraconductivité (H.Kamerlihg Onnes ,1911)[15] et la superfluidité (W.Hkeesom,1928) qui ne furent expliqués qu'au cours de la deuxième moitié du xxe siècle, avec l'émergence de la mécanique quantique .il est intéressant de rappeler qu'a l'époque où la plupart des expériences en physique étaient menées par des chercheurs indépendants travaillant avec de petits appareils , le laboratoire de H.Kamerlingh onnes à Leyde fut le premier exemple de recherche scientifique à « grande échelle » depuis, la cryogénie n'a cessé de progresser vers des températures de plus en plus basses (figures 2 .1 et 2.2) atteignant aujourd'hui des valeurs d'environ  $0.1 \text{ nK}$  dans les laboratoires spécialisés grâce à l'association de techniques de dilution de l'hélium[16] et de désaimantation adiabatique[17],[18],[19],[20],[21]

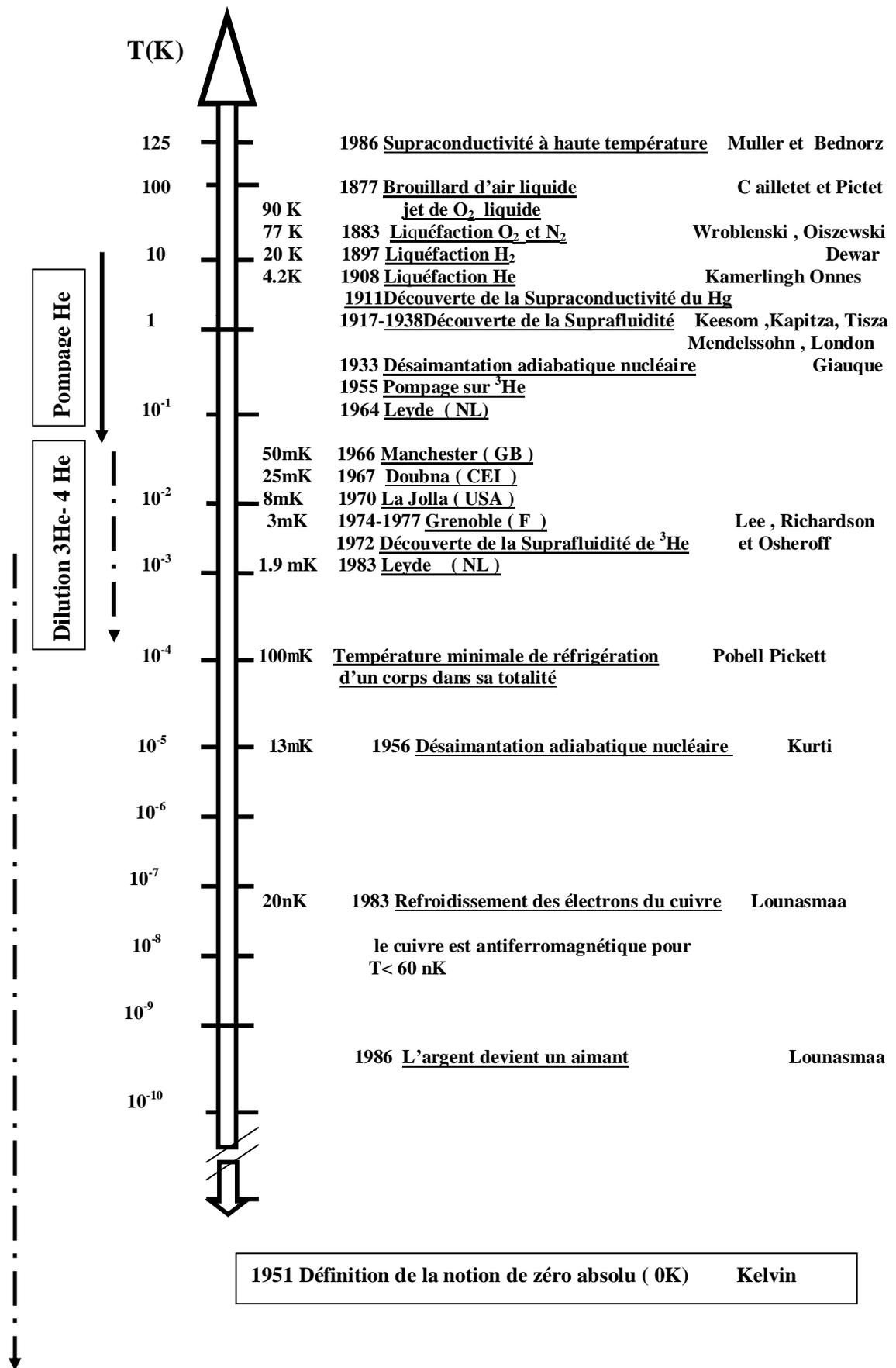


Figure 2.1 Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs

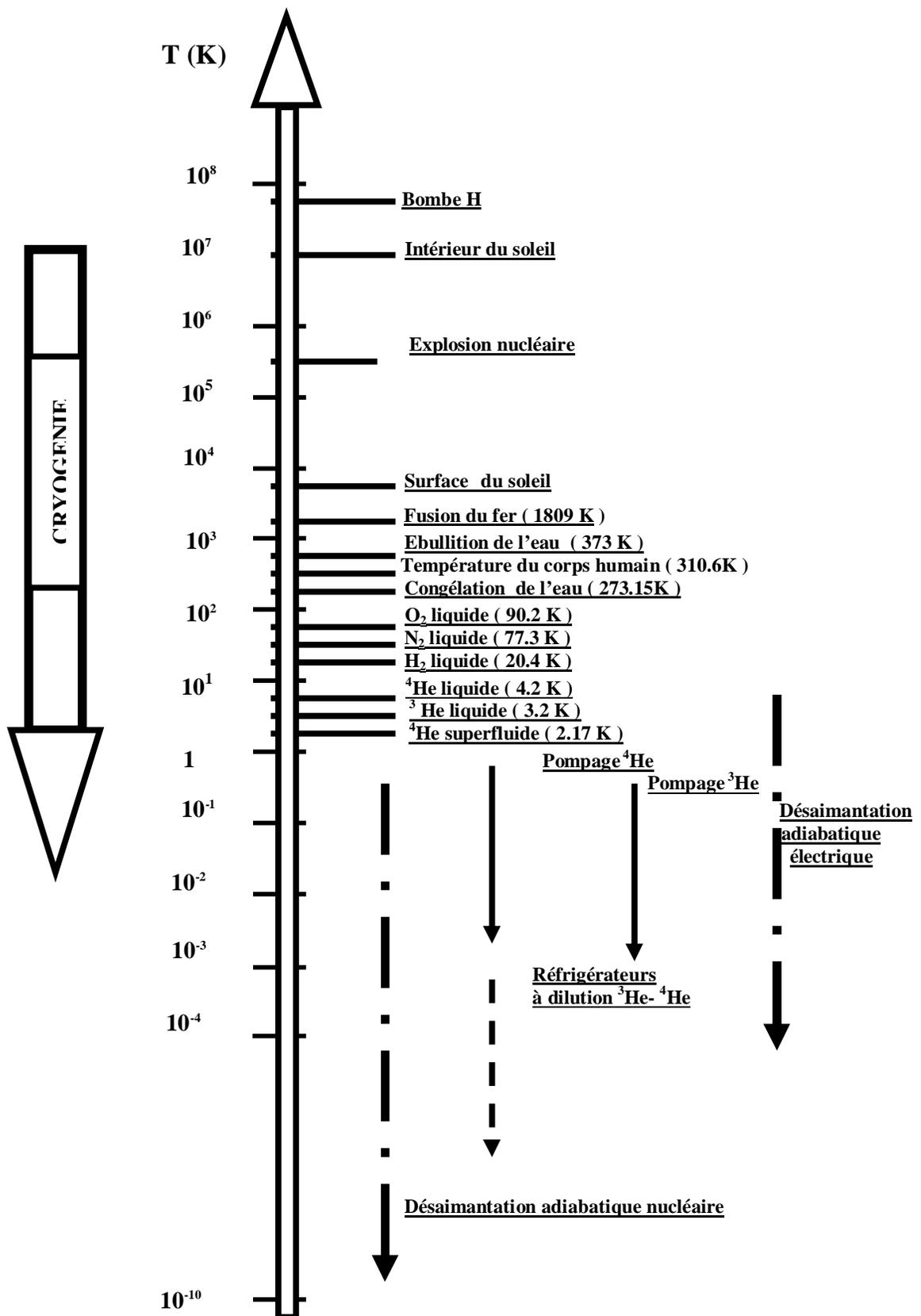


Figure 2.2– Echelle de température thermodynamique

De très nombreuses branches d'activité scientifiques et techniques utilisent actuellement la cryogénie [22] :

- les sciences physiques étudient des phénomènes spécifiques des basses températures ou qui exigent d'y travailler : supraconductivité, physique nucléaire, magnétisme, technique des gyroscopes de haute précision, électronique appliquée, etc.

- l'industrie chimique fait un usage croissant de l'oxygène pour les réactions et surtout de l'azote pour l'inertage des atmosphères. La production en quantité massive de l'éthylène ne peut se faire qu'à l'aide des basses températures pour sa séparation et sa purification finale.

- La biologie utilise le froid pour conserver divers produits (par lyophilisation), pour la préparation de produits pharmaceutiques et pour de nombreuses autres opérations.

- La médecine et la chirurgie emploient depuis longtemps des produits de base préparés grâce à la cryogénie : oxygène, protoxyde d'azote, plasma sanguin, etc.

- Les liquides cryogéniques usuels tels que l'oxygène et l'azote et les gaz rares de l'air sont employés en quantités massives dans la sidérurgie et la métallurgie (notamment argon/hélium pour la soudure)

- Quant aux industries spatiales, on sait que l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et l'hélium liquide sont à la base même de leur existence. l'oxygène et l'hydrogène liquides assurent la

propulsion des fusées, l'azote et l'hélium sont indispensables pour assurer l'inertage et le bon fonctionnement notamment des pompes d'alimentation à grand débit des moteurs de fusées.

L'utilisation du froid pour le traitement, la production ou la transformation des gaz constitue donc actuellement un des fondements essentiels de l'industrie moderne.

## **2.2 Propriétés physiques aux basses températures :**

### **2.2.1 Propriétés des fluides cryogéniques [23] :**

Les liquides cryogéniques ont des caractéristiques spécifiques, qui nécessitent une attention toute particulière mais qui offrent également de nouvelles possibilités d'utilisation. Au vu de leurs faibles températures critiques et de leurs pressions critiques modérées, les cryogènes sont souvent utilisés dans le domaine supercritique ; avec une transition continue de la phase liquide à la phase gazeuse et une divergence de certaines propriétés thermodynamiques au point critique.

plus la viscosité diminue à basse température, plus les écoulements de liquide ou de vapeur deviennent fortement turbulents ; permettant d'atteindre des nombres de Reynolds très élevés lors d'expérience de laboratoire, ce qui constitue un outil précieux pour étudier les lois d'échelle de la turbulence des fluides. De plus, la variation simultanée de la densité de la viscosité et de la température permet de maintenir les conditions de similitude de Reynolds et de Mach dans les écoulements à échelle réduite ; ce phénomène est à la base des souffleries cryogéniques, outils essentiels pour la Conception des ailes d'avions supersoniques pour lesquels les effets de la compressibilité ne peuvent être négligés. Enfin, le taux de dilatation volumique élevé à basse température engendre des nombres de Rayleigh élevés et une forte convection naturelle. Des expériences pionnières ont récemment été menées sur les écoulements contrôlés à très hauts nombres de Reynolds et de Rayleigh en utilisant l'hélium cryogénique [24].

Les principaux fluides utilisés et leurs caractéristiques [22] sont donnés dans un tableau (Annexe 1)

### **2.2.2 Propriétés des matériaux :**

Les techniques de réalisation des matériaux cryogéniques et la préparation d'ensembles expérimentaux aux basses températures mettent en œuvre des matériaux très variés : Matériaux isolants, conducteurs, voire surproducteurs électriques, Matériaux de structure ....

### 2.2.2.1 Propriétés thermiques :

Les Propriétés thermiques sont associées aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre, aux mouvements des électrons, etc. L'amplitude des vibrations diminue avec la température. D'autres effets peuvent aussi contribuer aux propriétés thermiques (caractéristiques magnétiques, état supraconducteur, etc. )

**a) Capacité thermique massique :** la Capacité thermique massique d'un matériaux peut être considérée comme la somme de plusieurs contributions (contribution associée au réseau cristallin, cristaux isolants, contribution associée aux électrons libres c'est le cas des métaux conducteurs), telle que

$$C = \sum_i C_i (T) = C_{ph} + C_e$$

$C_{ph}$  : la capacité thermique massique associée au réseau cristallin en fonction de la température de DEBYE. A basse température, elle varie comme le cube de la température [22], [25]

$$c_{ph} = b.T^3$$

Avec  $T$  : température absolue

$$b = \frac{12p^4.R}{5q_D^3}$$

Où  $R$  : Constante universelle des gaz parfaits.

$q_D$  : Température de Debye qui est une caractéristique du matériaux et qui est obtenue généralement par voie expérimentale, son expression théorique est donnée par :

$$q_D = \frac{h.v}{s} \left( \frac{3.N}{3p.V} \right)^{1/3}$$

Où  $h$  : Constante de PLANCK,

$s$  : Constante de STEFAN –BOLTZMANN.

$v$  : Vitesse du son dans le solide.

$N/V$  : nombre d'atomes par unité de volume du solide.

$C_e$  : Capacité thermique massique des électrons. La capacité thermique massique des électrons peut s'écrire [22] :

$$c_e = g.T$$

Où  $g$  : coefficient du terme électronique.

Ainsi, à basse température  $\left(T > \frac{\theta_D}{10}\right)$ , la capacité thermique massique d'un métal conducteur peut se mettre sous la forme :

$$c = b.T^3 + g.T$$

### **b) Conductivité thermique :**

On définit deux conductivités thermiques :

$K_{ph}$  : la Conductivité thermique du réseau.

$K_e$  : la Conductivité électronique.

Et la Conductivité thermique peut être représentée par la somme des deux contributions [22] :

$$K = K_{ph} + K_e$$

Avec

$$K_{ph} = 1/3 \cdot C_{ph} \cdot V \cdot L_{ph} \cdot \rho$$

$V$  : vitesse du son dans le solide.

$\rho$  : Masse volumique

$L_{ph}$  : libre parcours moyen des phonons

A basse température ( $T \ll \theta_D$ ),  $V$ ,  $\rho$  et  $L_{ph}$  peuvent être considérés comme constants et

$$K_{ph} / T^3 = \text{cte}$$

Et

$$K_e = 1/3 C_e V_F L_e \rho = \pi^2 n K_B^2 T \tau / 3 m_e$$

$m_e$  : Masse de l'électron.

$n$  : nombre d'électrons libre par unité de volume.

$V_F$  : la vitesse de fermi

$L_e$  : le parcours moyen des électrons

$\tau$  : Temps moyen de diffusion ( $\tau = L_A / V_F$ )

A basse température  $\tau = \text{cte}$ , donc  $K_e \propto T$

### c) Dilatation thermique :

A basse température, l'existence de contraintes thermiques différentielles peut être la source d'efforts mécaniques pouvant entraîner des ruptures d'assemblage.

Le coefficient de dilatation linéaire  $\alpha$  est défini par :

$$\alpha = \frac{1}{L} \left( \frac{dL}{dT} \right)$$

D'après la définition de  $\alpha$ , on peut en déduire la variation de longueur relative  $\Delta L / L$

$$\Delta L / L = \int_{T_i}^{T_f} \alpha(T) dT$$

A haute température, cette variation est proportionnelle à  $T$ , par contre à basse température, elle est proportionnelle à  $T^4$

### 2.2.2.2 Propriétés mécaniques :

Lorsqu'on construit une « structure » cryogénique, il est essentiel de prendre en compte les propriétés mécaniques des matériaux [22] utilisés à la température de fonctionnement.

La plupart des matériaux ductiles à température ordinaire deviennent fragiles à basse température.

Le comportement aux basses températures des différents métaux et alliages dépend de leur structure cristalline. Parmi les systèmes cubiques à face centrées (C.F.C) on peut citer le cuivre, nickel et ses alliages, l'aluminium et ses alliages, les aciers inoxydables (série 300), l'argent, le plomb, le laiton, L'or, le platine, en général ils restent ductiles jusqu'aux très basses températures.

Les systèmes cubiques centrées (C. C) tels que le fer  $\alpha$ , les aciers ferritiques ; les aciers au carbone, Les aciers au nickel ( $< 10\%$ ), le molybdène, le niobium, le chrome, le tungstène deviennent souvent Fragiles aux basses températures.

Dans les structures hexagonales compactes, on peut citer le zinc, le béryllium, le titane, le cobalt, le magnésium sont par fois fragiles, (zinc), par fois ductiles (titane), leur ductilité étant toute fois diminuée par la présence d'impuretés et principalement par l'  $O_2, N_2, H_2, \dots$

### **2.3 Transferts thermiques :**

L'enthalpie de formation des fluides cryogéniques est faible, la capacité thermique massique des matériaux tend vers zéro, la conséquence immédiate est que toute entrée de chaleur va entraîner une évaporation notable des fluides cryogéniques et/ ou des échauffements importants

La connaissance des caractéristiques à basse température des processus de Transfert thermique nécessite donc une approche particulière [22], [26]

#### **2.3.1 Conduction :**

C'est le procédé de transfert de chaleur à l'intérieur de la matière sans transfert de masse. Il est décrit par la loi de FOURIER

$$j' = - K S \frac{dt}{dx}$$

Avec  $\phi'$  : flux de chaleur en W passant à travers la section  $S$  en  $m^2$  au gradient de température  $dt/dx$ .

La conductivité thermique  $K$  en  $W/m.K$  est une propriété extrêmement importante en cryogénie : dans certains cas, il faut qu'elle soit très bonne (contact thermique) et, dans d'autres il faut qu'elle soit particulièrement faible pour éviter les transferts de chaleur parasites (isolement des cryostats)

### 2.3.2 Convection :

C'est le transfert d'énergie thermique par déplacement macroscopique de matière. On peut écrire.

$$j' = h_c \cdot S (T_p - T_f)$$

Avec :  $h_c$  coefficient de convection en  $W/m^2.K$

$S$  surface d'échange en  $m^2$

$T_p$  température de la paroi en K

$T_f$  température du fluide loin de la paroi en K

### 2.3.3 Rayonnement :

Le rayonnement que l'on considère à basse température est essentiellement de très grande longueur d'onde. C'est-à-dire dans l'infrarouge lointain. Le maximum d'énergie spectrale émise correspond en effet à des longueurs d'onde qui vont de 9.65 Nm à température ordinaire à 725 Nm à 4 K.

L'énergie  $W_R$  émise par rayonnement d'une surface  $A$  est donnée par l'équation de STEFAN BOLTZMANN :

$$W_R = \sigma e A T^4$$

$W_R$  : énergie rayonnée exprimée en Watts.

$e$  : pouvoir émissif de la surface  $A$ .

$\sigma$  : Constante de S. B :  $5.67 \cdot 10^{-12} W \cdot cm^{-2} \cdot K^{-4}$

$T$  : température en K

L'énergie rayonnée entre deux surfaces de températures  $T_1$  et  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ) s'écrit :

$$W_R = \sigma E A_1 (T_2^4 - T_1^4)$$

$A_1$  : aire en  $cm^2$  de la surface qui reçoit l'énergie à température  $T_1$ .

$E$  : facteur qui tient compte des pouvoirs émissifs  $e_1$  et  $e_2$  des surfaces aux températures  $T_1$  et  $T_2$ .

## 2.4 Stockage et transfert des fluides cryogéniques :

### 2.4.1 Isolation des vases de Stockage :

L'isolation thermique des vases ou réservoirs de stockage est d'autant plus importante que l'enthalpie de vaporisation des fluides cryogéniques est faible.

A titre d'exemple, 1 Wh (3600j) vaporise 22 cm<sup>3</sup> d'azote liquide ou 110 cm<sup>3</sup> d'hydrogène liquide ou encore 1400 cm<sup>3</sup> d'hélium liquide.

Ce problème de l'isolation est gouverné par la maîtrise des mécanismes de transfert de chaleur.

Pour isoler les réservoirs cryogéniques, on dispose d'un nombre important de matériaux isolants.

La conductivité thermique du matériau étant un facteur prépondérant ainsi que d'autres critères doivent aussi être examinés pour le choix d'un isolant : la facilité de mise en œuvre , la durée de vie , la fiabilité de l'isolation réalisée , le prix , l'inflammabilité ,la masse , les caractéristiques mécanique , les caractéristiques physiques , etc.

Pour l'isolation des réservoirs cryogéniques, le choix de l'isolant dépend souvent de la taille du réservoir (plus le réservoir est petit, plus les caractéristiques thermiques doivent être bonnes).

Le super isolant est toujours retenu pour les réservoirs de moins de 1000 L de capacité destinés aux fluides tels que l'azote, l'oxygène, l'argon.

En ce qui concerne le stockage de l'hélium et de l'hydrogène liquides, la super isolation est pratiquement obligatoire [22].

#### **2.4.2 Les différents types d'isolants :**

**MOUSSES :** elles sont régulièrement utilisées pour les gros stockages cryogéniques (l'azote, méthane, etc). Les mousses présentent les avantages suivants : faible masse volumique, fabrication aisée, coût relativement bas.

Les principales mousses utilisées à base de résines polystyréniques, des résines polyvinyliques, de polyuréthane, les mousses de verre.

**POUDRES** : les poudres entrent fréquemment dans l'isolation thermique des fluides cryogéniques, tout particulièrement pour les réservoirs de taille moyenne type basse pression ou les évaporateurs ; et pour certaines lignes de transfert on peut citer quelques types de poudres, tel que : la perlite, l'alumine, le carbone, le silicate de calcium, la silice et le dioxyde de titane.

**SUPER ISOLANTS** : le principe d'un super isolant est de réduire les échanges de chaleur par rayonnement sans augmenter les échanges par conduction solide tout en s'affranchissant de la conduction gazeuse.

L'étude des transferts thermiques aux basses températures montre que :

- le flux de chaleur par rayonnement peut être réduit en interposant entre la paroi froide et la paroi chaude un certain nombre d'écrans réflecteurs.
- le flux de chaleur par conduction gazeuse peut être pratiquement annulé si la pression inter paroi est faible ( $10^{-2}$  Pa).
- le flux par conduction solide est nul si on peut éliminer les contacts entre les écrans.

Le super isolant a pour rôle d'assurer le meilleur compromis pour réduire les principaux flux de chaleur Il se compose d'une succession d'écrans réflecteurs [22] entre les quels sont interposées des feuilles intercalaires peu conductrices. Les écrans réflecteurs sont constitués d'un métal réfléchissant

### **2.4.3 Lignes de transfert :**

Lignes de transfert, sont un élément essentiel dans la distribution des fluides cryogéniques, elles existent sous forme rigide ou souple.

#### **a) Divers types d'isolation des lignes :**

La qualité de l'isolant utilisé est essentielle dans la performance de la ligne, les différents types sont :

Mousse de polyuréthane, Perlite sous vide, Alumine sous vide, Lignes super isolées.

#### **b) Jonction entre tronçons de lignes de transfert :**

Seule la ligne polyuréthane peut être conçue en un seul tronçon à condition de prévoir des lyres de dilatation suffisantes. Tous les autres types de lignes fabriquées en atelier sont livrés en

tronçons de quelques mètres (6 à 10 m selon le cas). Pour ces lignes, il est nécessaire de joindre les tronçons sans créer de fuites thermiques importantes.

#### **2.4.4 Cryostats :**

Un Cryostat abrite un ensemble opérationnel autonome devant être maintenu à basse température : Expérience de laboratoire, cryoalternateur, imageur à résonance magnétique, etc. il se distingue donc des réservoirs destinés à conserver les fluides cryogéniques.

Un Cryostat rassemble en général un réservoir de stockage de fluides cryogéniques et un dispositif expérimental. Il peut aussi comprendre un ou plusieurs systèmes de réfrigération – liquéfaction (appareil à dilution).

Les Cryostats réalisés actuellement sont en général métalliques (acier inoxydable le plus souvent)

Dans quelques cas particuliers, on utilise des Cryostats en verre. Un Cryostat comporte toujours une enceinte à double paroi, entre ces parois, on réalise un vide d'isolement thermique poussé ( $\leq 10^{-4}$  Pa).

# Chapitre 3

## Les Cycles de Liquéfaction

### 3.1 Définition de la réfrigération et de la liquéfaction

La réfrigération d'un système consiste à en extraire de l'énergie, cette énergie peut être reçue de l'extérieur ou dissipée dans le système. On opère souvent dans ce cas à température constante. Par contre, 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.

### 3.2 Importance et utilisation des gaz liquéfiés

L'obtention et l'utilisation des gaz liquéfiés répondent à trois besoins essentiels [27] :

- obtention de gaz purs à partir d'un mélange de gaz
- facilité et économie de transport des gaz
- usage des basses températures

#### **a) Obtention des gaz purs :**

Le but initial de la liquéfaction des gaz était la séparation des mélanges gazeux et l'obtention de gaz pur.

Les travaux des premiers chercheurs s'appliquaient à la séparation des fractions gazeuses de l'industrie chimique, par ailleurs, ils cherchaient également à séparer les composants de l'air (oxygène, azote, gaz rares)

#### **b) Facilite et économie du transport:**

Le transport des gaz à moyenne distance dans les canalisations ne se justifie que pour des débits importants assurés en des points bien déterminés, avec une certaine permanence dans le temps.

Pour le gaz naturel, par exemple, son transport par gazoduc est rentable pour des parcours terrestres où les débits sont importants et permanents. Pour les parcours maritimes on se heurte alors à des difficultés sérieuses : les pipes sous-marines sont très coûteuses et sont exposées à de hauts risques. Pour les autres gaz tels que l'oxygène et l'azote, par exemple, ils sont livrés par petites quantités, il n'est pas possible d'installer des canalisations de distribution. Ces gaz sont généralement livrés à l'état comprimé à 150 bar dans des bouteilles en acier. En raison de la grande épaisseur de ces bouteilles appelées à résister à une pression intérieure assez élevée, on obtient, alors, un poids important, la bouteille vide pèse 70 à 90 kg pour une charge utile de gaz inférieure à 10 kg.

Ceci a l'inconvénient du transport d'un poids mort de 7 à 9 fois supérieur à la charge utile entre le lieu de production et le lieu d'utilisation.

La solution la plus intéressante de nos jours consiste à liquéfier les gaz et à les transporter à l'état liquide par mer, par route ou par rail.

En effet, sous l'état liquide, un gaz occupe un volume environ 600 fois moindre que celui qu'il occupe à l'état gazeux dans les conditions normales de température et de pression.

Au point d'arrivée, les gaz sont regazéifiés pour être distribués à la consommation. Le gaz naturel, par exemple, est regazéifié puis distribué par canalisations.

L'oxygène et l'azote arrivent à l'état liquide aux centres de conditionnement où ils sont regazéifiés et mis en bouteilles pour la distribution à courte distance.

### **c) Usage des basses températures :**

Sous certaines conditions, la plupart des gaz ont des températures de condensation inférieures à la température ambiante et même inférieures à 0°.

Les gaz liquéfiés peuvent donc se trouver à de basses températures et les applications y sont nombreuses. Outre l'utilisation des gaz liquéfiés pour les besoins de la réfrigération et de la climatisation, leur usage est également important dans l'industrie et dans les laboratoires de recherche où on a besoin d'effectuer des opérations et des expériences diverses à très basse température.

### **3.3 Comment réaliser la liquéfaction des gaz ? [28]**

Nous savons que la matière se présente sous trois états solide, liquide et gazeux

La distinction entre ces états étant basée sur :

- \* La distance entre les particules (atomes, molécules, ions) qui constituent la matière

- \* L'agitation de ces particules.

Les particules à l'état gazeux sont très éloignées les unes des autres, avec une agitation rapide et désordonnée. On observe également de nombreux chocs entre elles.

Pour l'état liquide, les particules sont beaucoup plus rapprochées les unes des autres, Elles se déplacent à faible vitesse donnant lieu à des associations temporaires (liaisons Faibles).

A l'état solide, les particules sont empilées dans un ordre régulier, elles sont très rapprochées les unes des autres.

Sur ces bases, on pourra dire que le passage de l'état gazeux vers l'état liquide pourra s'effectuer par la diminution de la distance entre les particules (rapprochement) et par le ralentissement du déplacement de ces particules et on peut réaliser cela :

- Par la compression : l'augmentation de la pression exercée sur le gaz diminue le volume offert au gaz et rapproche les particules entre elles.

Cependant, l'agitation des particules demeure importante et la température s'élève à cause des chocs. Il faudra donc abaisser la température.

- Et par l'abaissement de la température : la diminution de température extrait de l'énergie calorifique du milieu et ainsi l'énergie cinétique des particules se trouve réduite et les particules se déplacent moins vite.

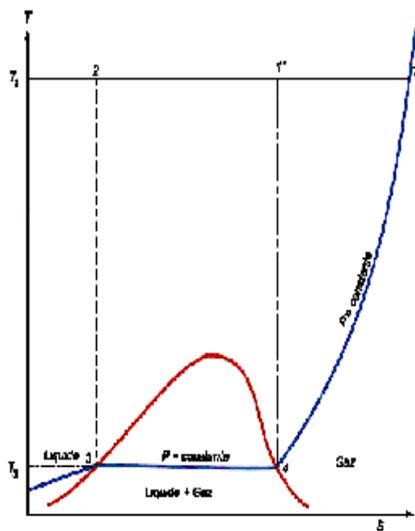
Le rapprochement conjugué au ralentissement permet l'établissement de liaisons entre particules : ce qui provoque **la formation du liquide**

Conclusion : d'après ce qui précède, on voit qu'un gaz peut être liquéfié si on le **comprime** tout en **abaissant sa température**.

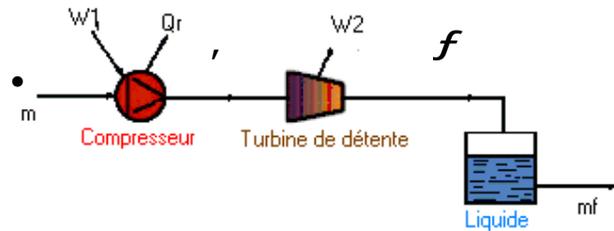
### **3.4 Les différents types de systèmes de liquéfaction**

#### **3.4.1 Cycle idéal de liquéfaction :**

Un cycle idéal de liquéfaction sera idéal s'il réalise la production de liquide avec le maximum de rendement, c'est -à -dire le minimum de consommation d'énergie extérieure. Un tel cycle devra donc pour cela faire appel à certaines transformations qui caractérisant le cycle de Carnot. La différence avec celui - ci est qu'il s'agira d'un cycle ouvert, car le liquide produit est supposé être retiré du système en continu.



**Figure 3.1.a Diagramme T-S D'un cycle idéal**



**Figure 3.1.b Schéma de principe D'un cycle idéal**

Le cycle idéal comprendra donc deux phases : figures 3.1.a et b

- de 1 en 2 : **une compression isotherme réversible.**
- de 2 en 3 : **une détente isentropique** ; le point 2 sera choisi de telle sorte qu'en 3 le palier de liquéfaction correspondant à la pression la plus basse possible (celle du point 1, c'est-à-dire la pression atmosphérique) soit atteint. On obtiendra ainsi la liquéfaction à 100% du gaz comprimé en 1-2, le travail nécessaire à la liquéfaction est représenté par l'aire 1- 2- 3- 4.

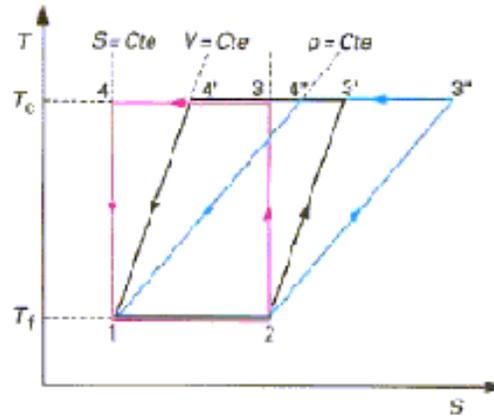
Remarque : on notera que cette aire se décompose en aire 1- 1' - 4 , chaleur (ou travail) nécessaire pour refroidir le gaz à la température de liquéfaction  $T_3$  et en 1',2,3,4 travail proprement dit de liquéfaction .

En cryogénie, l'écart important entre la source chaude et la source froide, ne permet pas d'envisager pratiquement la réalisation du cycle de Carnot, qui demeure un cycle idéal, de référence seulement.

Ce problème a été résolu en déformant le cycle de Carnot, les transformations isentropiques sont remplacées par des transformations réversibles isochores (cycle de Stirling) ou

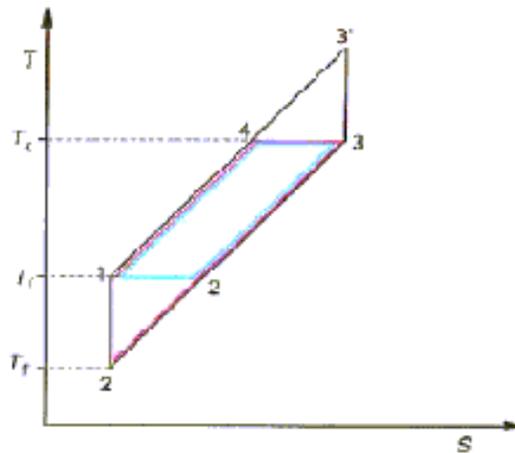
isobares (cycle d'ERICSSON) figure 3.2, si l'échange isotherme 1-2 du cycle d'Ericsson est remplacé par une détente adiabatique réversible, on obtient le cycle de SIEMENS.

Si l'on remplace, en outre l'échange isotherme à la température ambiante 3-4 par une compression adiabatique réversible, on obtient le cycle BRAYTON figure 3.3



**Figure 3.2 Cycles réversibles :**

- Cycle de Carnot (isotherme-isentrope) 1,2,3,4**
- Cycle de Stirling( isotherme -isochore) 1,2,3',4'**
- Cycle d'Ericsson (isotherme -isobare) 1,2,3'',4''**



**Figure 3.3** **Cycle d'Ericsson 1,2,3,4**  
**Cycle de Siemens 1,2',3,4**  
**Cycle de Brayton 1,2',3,3'**

En pratique, on cherche à faire évoluer un fluide cryogénique suivant une succession de transformations tendant d'approcher au mieux les cycles thermodynamiques à rendement maximal. Cette optimisation thermodynamique peut conduire à des machines complexes pour les faibles

Puissances relativement faibles, donc à un investissement excessif. Le cop des machines existantes s'écarte du cop théorique de Carnot du fait des irréversibilités inhérentes aux évolutions réelles.

### 3.4.2 Cycles pratiques

L'échange de chaleur entre le fluide haute pression et le fluide basse pression peut s'effectuer en faisant circuler soit un débit continu dans un échangeur à contre – courant, soit un débit alterné dans un régénérateur ; on définit ainsi deux catégories de cryogénérateurs [22], [29] :

#### 3.4.2.1 cycles à échange ou à flux continu:

Ces cycles font appel à deux types de détente qui permettent de refroidir et / ou liquéfier les fluides Cryogéniques ; la détente isenthalpique et la détente par extraction d'énergie :

**La détente isenthalpique** : souvent appelée « détente JOULE-THOMSON » ne produit du froid qu'au dessous de la température d'inversion ( $T_i$ ). L'hélium, l'hydrogène et le néon ont une température d'inversion inférieure à la température ambiante ; la liquéfaction de ces gaz par détente J T nécessite donc un pré refroidissement. L'intérêt de cette détente lié à sa simplicité de mise en œuvre vanne ou capillaire. Elle est souvent utilisée pour produire du liquide comme dernière étape d'un cycle à étages multiples

**Détente avec extraction d'énergie** : est une détente isentropique qui fournit un travail.

#### a) Cycle de JOULE – THOMSON [22], [29], [30]:

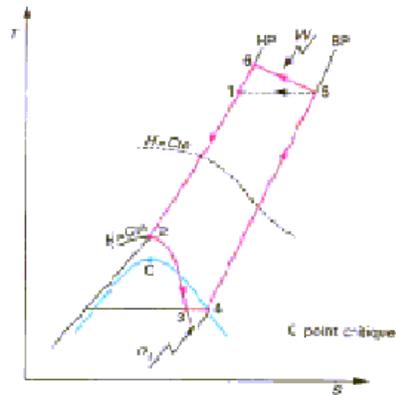
La détente d'un gaz sous pression au travers d'un orifice ou d'une vanne, sans échange de travail ni de chaleur avec le milieu extérieur est un processus à enthalpie constante ( $\Delta H=0$ ) figure 3.4.a.

Cette détente, si elle s'effectue au dessous de la température d'inversion, s'accompagne d'un refroidissement du gaz .Un réfrigérateur de J. T comprend une source de gaz haute pression, un échangeur à contre –courant et une vanne ou orifice de détente figure 3.4.b.

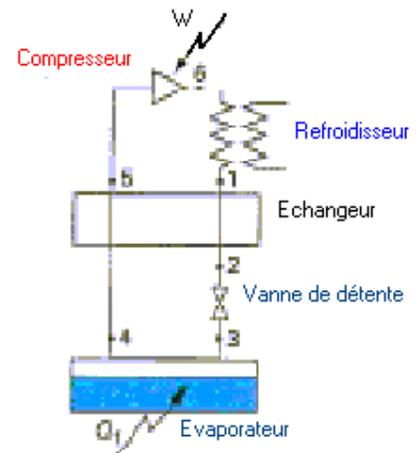
Les principaux avantages sont la possibilité d'installer la partie froide à distance de la source de gaz haute pression, en revanche , la consommation spécifique est forte car le processus de détente isenthalpique est irréversible et une valeur élevée de haute pression est nécessaire .

Le cycle de J.T n'est pas utilisé pour les fortes puissances .l'association de plusieurs cycle de J.T, Fonctionnant avec des fluides différents tels que l'azote (77 K) et l'hydrogène (20 K) et dont

Les températures échelonnées assurent les pré-refroidissements successifs d'un cycle d'hélium dans un arrangement en cascade, permet d'atteindre la température de l'hélium liquide.



**Figure 3.4.a Diagramme T-S  
De cycle de Joule –Thomson**

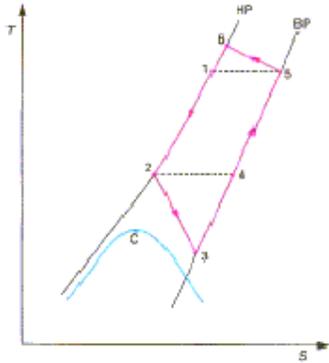


**Figure 3.4.b Schéma de principe  
De cycle de Joule –Thomson**

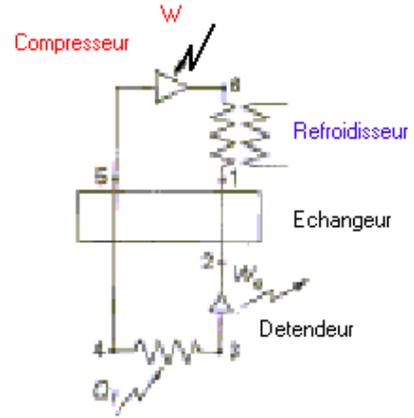
**b) Cycle de BRAYTON :**

Dans le cycle de BRAYTON la détente isenthalpique du cycle de Joule Thomson est remplacée par une détente avec extraction d'énergie [22], [30] (Figures 3.5.a et b) La puissance utile peut être obtenue jusqu'à des températures de l'ordre de 10 K.

La présence d'un détendeur mécanique froid (alternatif ou rotatif) permettant l'extraction d'énergie du gaz, oriente plutôt l'utilisation de ces machines vers les fortes puissances frigorifiques



**Figure 3.5.a Diagramme T-S  
De cycle de Brayton**



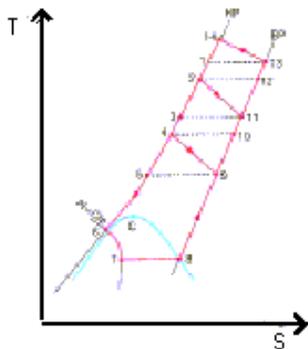
**Figure 3.5.b Schéma de principe  
De cycle de Brayton**

**c) Cycle de CLAUDE [22], [30] :**

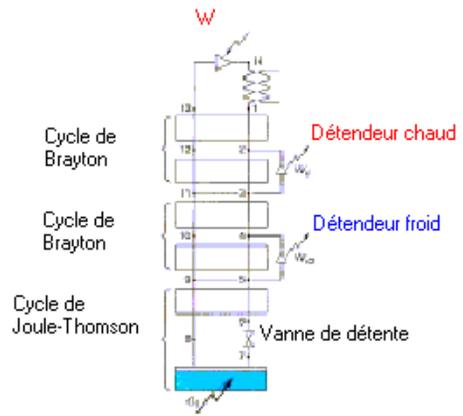
Le cycle de Claude est l'assemblage d'un cycle de Brayton à un ou plusieurs étages et d'un cycle de Joule Thomson (figures 3.6.a et b) le cycle de Brayton prèrefroidit Le cycle de Joule Thomson .Afin d'accroître l'efficacité des cycles de réfrigération, le nombre d'étages de détente avec extraction d'énergie peut être augmenté, les températures de ces étages sont alors échelonnées

La détente finale peut, dans le cas de grosses machines, être effectuée en extrayant de l'énergie,

Le procédé permet d'augmenter de 20 à 30 % la production d'un appareil moyennant un supplément d'investissement modeste.



**Figure 3.6.a Diagramme T-S  
De cycle de Claude**



**Figure 3.6.b Schéma de principe  
De cycle de Claude**

**3.4.2.2 cycles à régénérateurs ou à flux alternés [22]**

#### **a) Machines SOLVAY et GIFFORD –MACMAHON :**

Dans le cas des machines de type SOLVAY, la détente s'effectue au moyen d'un détendeur mécanique froid, le régénérateur est fixe.

Dans le cas des machines de type GIFFORD –MACMAHON, qui sont les plus répandues pour les faibles puissances, il n'y a pas récupération du travail de détente, ce qui nécessite une consommation spécifique plus élevée .ces machines comportent un simple piston – déplaceur commandé mécaniquement ; le régénérateur étant généralement incorporé à ce déplaceur.

#### **b) Machines STIRLING :**

Initialement développées comme moteurs, ces machines sont actuellement utilisées en tant que machines frigorifiques en décrivant le cycle en sens inverse.

Ce type de machines peuvent être à régénérateur et pistons moteurs mobiles ou à régénérateur fixe et comportant soit deux pistons (moteur et détendeur), soit un piston et un déplaceur.

Les machines STIRLING ne nécessitent aucun clapet, ce qui représente un atout pour leur fiabilité.

#### **c) Machines à tube à gaz pulsé :**

Leur principe a été proposé par GIFFORD et LONGSWORTH dès 1963. Leur principal avantage par rapport aux machines à cycle de STIRLING l'absence des pièces mobiles à froid.

#### **d) Machines Vuilleumier :**

Dans ce type de machines- rarement utilisé – le compresseur mécanique est remplacé par un compresseur thermique conduisant à une machine tritherme –à trois températures différentes  $(T_a, T_c, T_f)$ , une énergie  $j_c$  est fournie à la source chaude  $T_c$ , l'énergie  $j_f$  est absorbée à la source froide  $T_f$  et  $j_a = j_c + j_f$  est rejetée à la température intermédiaire  $T_a$ .

#### **3.4.2.3 Cycles magnétiques :**

Ces Cycles reposent sur l'effet magnéto calorifique l'application d'un champ magnétique augmente l'alimentation d'un matériau paramagnétique et entraîne un dégagement de chaleur.

Cet effet est réversible et une désaimantation adiabatique va donc s'accompagner d'un refroidissement.

### **3.5 Equipements utilisés**

#### **3.5.1 Compresseurs cryogéniques:**

Les compresseurs cryogéniques peuvent être volumétriques (alternatifs ou rotatifs) ou à impulsion (centrifuges) deux contraintes sévères nous obligent de faire un bon choix d'un type par rapport à un autre [22], [29].

- 1) le processus de compression qu'il soit le plus possible isotherme.
- 2) et doit se faire sans polluer le gaz afin de ne pas boucher les échangeurs.

Les compresseurs alternatifs secs ; sont chers et peu fiables et les compresseurs lubrifiés, qui ont une grande fiabilité mais polluent les gaz par de l'huile.

Le développement de systèmes de séparation d'huile très performants a permis d'utiliser le compresseur à vis lubrifié, dans lequel la grande quantité d'huile injectée permet d'obtenir une compression isotherme. Ce type de compresseur est très fiable (jusqu'à 40000 h sans entretien) car le nombre de pièces en mouvement est faible. Il équipe maintenant la quasi – totalité des réfrigérateurs de conception moderne la grande quantité d'huile injectée dans un compresseur à vis doit être séparée dans un système de déshuilage. La séparation de l'huile s'effectue de la manière suivante :

- Les aérosols sont arrêtés par une série de filtres coalesceurs qui agglomèrent les minuscules vésicules sur des fibres, elles – mêmes de très petit diamètre. les gouttes d'huile s'écoulent ensuite par gravité à l'intérieur du milieu filtrant et sont collectées à la partie inférieure de la boîte à filtre. Cette huile est recyclée au compresseur ;
- La très faible quantité de vapeur d'huile est absorbée sur un lit de charbon actif spécial fonctionnant à la température ambiante. un filtre arrête les particules qui pourraient être relâchées par le charbon actif.

Pour des débits volumétriques de fluides cryogénique importants (jusqu'à 300 l/s) on recommande les compresseurs centrifuges qui ont l'avantage de supporter les grandes vitesses (40000 à 100000 tr/min) et ne pas apporter de pollution.

### **3.5.2 Les échangeurs :**

Mis à part les appareils de laboratoire , dont certains utilisent des échangeurs bobinés , les réfrigérateurs modernes sont construits avec des échangeurs à plaques ailettées en alliage d'aluminium , qui sont compacts et efficaces [22] .

### **3.5.3 Les régénérateurs :**

Le régénérateur est destiné à stocker momentanément la chaleur cédée par le fluide haute pression s'écoulant de la température ambiante  $T_c$  à la température froide  $T_f$  avant de la restituer à ce fluide repassant de  $T_f$  à  $T_c$  après détente. Il joue un rôle essentiel dans l'efficacité d'un cryoréfrigérateur à flux alterné, idéalement, ce régénérateur devrait avoir :

- Une capacité thermique infinie par rapport à celle du fluide cryogénique pour limiter ses oscillations en température, lors des alternances de flux.
- Une conduction thermique nulle longitudinalement pour empêcher les apports de chaleur parasite par conduction du bout chaud au bout froid.
- Une conduction thermique infinie dans le sens radial pour assurer une bonne diffusivité thermique lors des échangeurs ;
- Un volume mort minimal (c'est -à -dire une porosité faible) ;
- Une perte de charge minimale à l'écoulement du fluide cryogénique (transparence élevée) afin de limiter l'énergie de compression non utile au cycle.

### **3.5.4 Machines de détente cryogénique**

#### **a) Le détendeur alternatif :**

Fut la première de détente utilisée. Il est encore apprécié par les opérateurs de petits appareils de laboratoire qui peuvent en assurer facilement l'entretien. Sa vitesse de rotation est limitée à 300 tr/ min .lorsque la débit volumétrique à traiter augmente, il devient rapidement impossible d'augmenter la cylindrée et la vitesse de rotation. Seule la turbine permet d'apporter la fiabilité et l'efficacité requises [22], [29].

#### **b) Les turbines à paliers à gaz hydrostatiques ou hydrodynamiques :**

A paliers statiques, elles sont alimentées par un faible débit de gaz haute pression (environ 4 % du débit de cycle) et ont, de ce fait, une force sustentation importante et indépendante de la vitesse de rotation.

Les paliers dynamiques, qui n'ont pas à être alimentés supportent mal les variations rapides des conditions de fonctionnement et ont force de sustentation décroissante avec la vitesse de rotation.

La technologie actuelle des paliers à gaz est bien adaptée à la réfrigération. Les paliers statiques permettent d'atteindre des puissances extraites dans la gamme des 100 KW, autre fois réservée aux seules turbines à paliers à l'huile.

### **3.5.5 Autres composants :**

Les autres composants particuliers qui constituent un liquéfacteur ou réfrigérateur sont :

- Les vannes cryogéniques.
- Les adsorbants : il est possible que, pendant de longues périodes de fonctionnement, des fuites se déclarent. Les quantités d'impuretés, même à des concentrations très faibles peuvent alors provoquer le bouchage des circuits.

Pour pallier cet inconvénient, une capacité remplie de matériau adsorbant est intercalée dans le circuit haute pression à une température permettant de piéger les impuretés.

## **3.6 Performances des cycles de liquéfaction**

### **a) Température limite :**

Pour les machines à faible puissance, l'importance des entrées parasites de chaleur peut affecter très sensiblement la température limite.

- **Machines à flux continu :**

La limite des machines de Joule Thomson ou de Claude est donnée par la température d'ébullition du fluide cryogénique utilisé qui est à la base pression du cycle, autour de 4.5 K pour l'hélium. La compression cryogénique permet d'atteindre des températures inférieures à 1.7 K.

- **Machines à flux alterné :**

La limite minimale atteinte avec des machines à flux alterné est limitée par la perte d'efficacité du régénérateur aux basses températures. L'utilisation de plusieurs étages de détente et de régénération permet d'évacuer une charge thermique à une température intermédiaire. Les machines à un seul étage avec régénérateur en laiton ou en acier inoxydable permettent d'atteindre 30 K, l'adjonction d'un second étage de régénération en plomb reporte la limite au voisinage de 10 K.

- b) Puissance frigorifique**

- \*Machine à flux continu :**

Elles sont utilisées pour les fortes puissances de réfrigération, en particulier les machines de Baryton et de Claude. Les domaines d'utilisation des machines à flux continu sont :

- La liquéfaction d'hélium pour laboratoire : de 5 à 200 L/h
- La liquéfaction d'hélium en sortie des installations d'extraction : de 500 à 3000 L/h ;
- La liquéfaction d'hydrogène : de 500 à 40 000 L/h ;
- La réfrigération en circuit fermé à environ 4.5 K : de 20 à 20 000 W.
- La réfrigération à environ 20 K : de 200 à 20 000 W.

Pour les très faibles puissances, les machines de Joule –Thomson sont utilisées à 80 K malgré leur faible rendement mais à cause de leur simplicité. Associées à des machines à régénérateur elles permettent aussi d'atteindre 4.5 K dans un encombrement réduit pour refroidir des systèmes à faibles pertes. Les machines de Brayton sont peu adaptées aux faibles puissances ( $< 1W$  à 10K et  $< 100W$  à 100K), En particulier à cause de la masse et de l'encombrement des compresseurs et détendeurs alternatifs, De la difficulté de miniaturiser les turbines de détente en conservant un rendement acceptable

- Machine à flux alterné**

Elles sont principalement utilisées pour des puissances inférieures à 5W à 10K et 500W à 100K.

Le domaine des fortes puissances est pratiquement interdit aux cycles à régénération car l'augmentation de la cylindrée et de la fréquence de fonctionnement est limitée, le volume et la masse du régénérateur deviennent vite problématiques

# **Chapitre 4**

**Cycle de CLAUDE**

**Pour la liquéfaction de l'air**

## **4.1 L'historique et développement du cycle de Claude**

En 1902 le scientifique Français GEORGE CLAUDE a amélioré le processus de LINDE en ajoutant une machine d'expansion au cycle de liquéfaction.

La concurrence entre LINDE et CLAUDE et leurs compagnies a stimulée une énorme montée subite dans le développement de l'industrie cryogénique

En la même année 1902, LINDE a récupéré pour la première fois à partir de l'air de l'oxygène pur. cette production d'oxygène par rectification était une incitation pour CLAUDE afin de développer son cycle et faire le mieux ; il a construit ce qu'on appelle « retour en arrière » où il a placé un échangeur de chaleur sous forme de tubes verticaux disposés dans la partie inférieure de la colonne de distillation , cet échangeur joue le rôle d'un bouilleur , le condensation de reflux légèrement enrichi en O<sub>2</sub> alimente le milieu de la colonne de distillation , le gaz restant légèrement enrichi en N<sub>2</sub> a été condensé dans les autres tubes coulant en bas et détendre dans la partie supérieure de la colonne , mais en utilisant cette méthode , l' O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub> obtenus ne sont pas de degré de pureté élevé , donc ils ont aboutir à une solution « colonne double » où on peut avoir un degré de pureté acceptable .

## **4.2 Séparation de l'air**

Le procédé de la séparation de l'air comporte les opérations suivantes [34] :

- la compression
- l'épuration
- le refroidissement
- la liquéfaction
- la distillation

### **4.2.1 Aspiration et compression de l'air ambiant :**

C'est l'une des parties les plus importantes de l'installation ; l'air est aspiré à 12 mètres du sol grâce à un turbocompresseur. Si l'on prend un débit entrant d'environ 30.000 m<sup>3</sup>/h (débit mesuré à la pression atmosphérique, à la température de 15°C), cela donne lieu à la production de

400 t/jour de gaz liquides (azote, oxygène et argon). Lors de son aspiration, l'air est comprimé à environ 5 bars.

#### **4.2.2 L'épuration de l'air :**

L'air ambiant n'est pas pur, il est donc indispensable de le purifier en piégeant ses constituants (humidité, dioxyde de carbone, hydrocarbures, particules de poussière) afin d'éviter la formation de bouchons de neige carbonique et de glace lors de refroidissement.

D'autres part, l'oxygène réagit chimiquement (risque d'explosion) à la présence d'hydrocarbures.

Un premier niveau d'épuration est réalisé grâce à des filtres retenant les particules de plus de 2 microns. Une seconde étape a ensuite lieu, l'air est filtré par un tamis moléculaire rempli d'alumine et de zéolithe ; afin d'accélérer cette opération, deux tamis fonctionnent en alternance, pendant que l'un est utilisé, l'autre est régénéré.

#### **4.2.3 Le refroidissement de l'air :**

Il se fait dans des échangeurs de chaleur à contre – courant, soit dans les régénérateurs ou échangeurs réversibles en même temps que l'épuration.

#### **4.2.4 La liquéfaction de l'air :**

Une partie de l'air est liquéfiée dans la ligne d'échange, La production de froid nécessaire est obtenue par détente avec travail extérieur dans une turbine ou pour les faibles débits, dans un détendeur à piston, cette détente est toujours limitée aux conditions thermodynamiques qui évitent l'apparition de liquide.

#### **4.2.5 La distillation :**

La distillation se fait dans des colonnes classiques à plateaux superposés, mais d'écartement faible pour éviter un très grand encombrement et des pertes de chaleur par rayonnement.

Pour effectuer la séparation, il faut porter l'air à la température de rosée grâce à une récupération des frigories des gaz sortant des colonnes de distillation.

L'air devenu liquide est remonté dans une colonne de distillation pour séparation d'azote. L'azote est le gaz qui se liquéfie à la température la plus basse pour une pression donnée, dans la colonne de distillation, ce gaz est dans des conditions ne lui permettant pas de rester liquide, l'azote redevient donc gazeux et remonte la colonne de distillation.

Cette loi physique a pour conséquence une accumulation d'azote pur en tête des colonnes. Un circuit complémentaire constitué d'un compresseur et de turbines de détente permet de liquéfier l'azote gazeux accumulé en tête de colonne, à ce moment là la pureté de l'azote est de 99,95%.

Dans le bas de la colonne, il reste un « liquide riche » à forte teneur en oxygène et argon. Ce liquide passe dans une colonne basse pression qui présente des conditions pression /température différentes. Dans cette colonne, les résidus d'azote sont évacués ; après cette seconde distillation l'oxygène est pur à 99,6%.

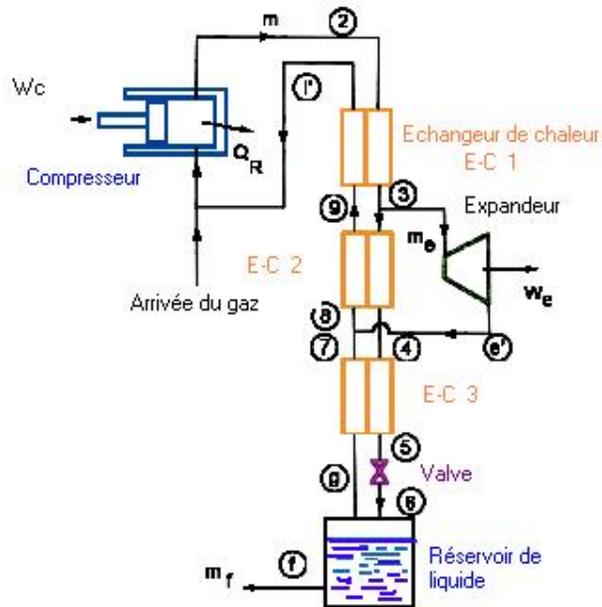
Le troisième constituant de l'air – argon – est faiblement représenté, mais il est « piégé » de la même façon que l'oxygène ou l'azote.

#### **4.3 Principe de cycle de Claude [29]**

Le cycle de Claude a perfectionné le processus de liquéfaction de l'air en associant l'utilisation d'une machine de détente et d'une vanne à effet Joule- Thomson.

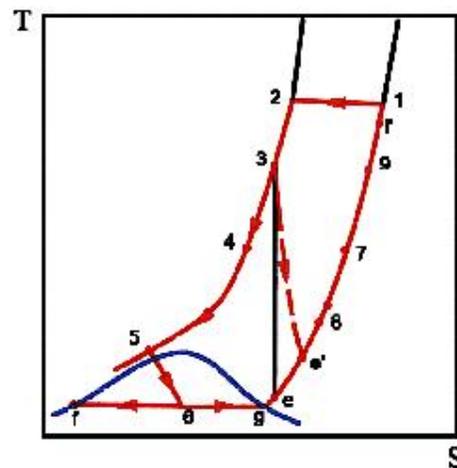
Ce cycle comprend comme illustre la figure 4.1 :

- un compresseur
- Un premier échangeur de chaleur, à la suite duquel une fraction importante du gaz à haute pression passe dans une machine de détente et est envoyé vers le gaz à basse pression.
- Un deuxième et un troisième échangeur, dans lesquels passe le reste du gaz à haute pression.
- Une vanne de détente.
- Un réservoir de liquide avec séparation du gaz qui retourne au compresseur à travers les trois échangeurs.
- Une entrée du gaz frais au compresseur.
- Une extraction du liquide



**Figure 4.1 schéma de principe de cycle de Claude**

Le principe de fonctionnement est comme suit (Figure 4.2) : le gaz est d'abord comprimé de  $P_1$  à  $P_2$  à température constante, il est refroidi de 2 en 3 dans le premier échangeur. Une partie  $m_e$  est détendue dans la turbine par une détente isentropique qui l'amène en  $e$ , ce gaz s'ajoute ensuite au courant gazeux qui revient du réservoir de liquide. Le reste du gaz traverse les deux autres échangeurs en 4 et 5, il subit une détente isenthalpique dans la vanne et pénètre dans le réservoir. Une partie se liquéfie et évacuée en  $f$ , la partie gazeuse se dégage en  $g$  et traverse toute la série des échangeurs, après mélange en  $e$  avec la partie  $m_e$ , le courant gazeux est réchauffé à  $T_1$  et retourne à l'aspiration du compresseur avec une masse  $m_1$  de gaz frais.



**Figure 4.2 Le diagramme T-S de cycle de Claude**

## 4.4 Production de basses températures

### 4.4.1 Effet de Joule- Thomson : [5], [35]

C'est une détente isenthalpique sans travail extérieur ce type de détente , qui est le premier mode fondamental de production du froid ,se produit par passage d'un gaz réel dans un orifice étroit, les échanges de chaleur avec l'extérieur étant supprimés par un calorifuge .

Soit une masse de gaz unité qui s'écoule à travers un orifice .la pression passe  $P_1$  à  $P_2$  de et le volume de  $V_1$  à  $V_2$

Le travail de transversement est :

$$W = P_2 V_2 - P_1 V_1$$

La chaleur échangée avec l'extérieur est nulle par hypothèse ( $Q = 0$ ).

La variation d'énergie interne est alors :

$$U_2 - U_1 = -W = P_1 V_1 - P_2 V_2$$

$$U_2 + P_2 V_2 = U_1 + P_1 V_1$$

$$H_2 = H_1$$

L'enthalpie du gaz n'a pas donc varié, la détente JOULE THOMSON est isenthalpique  $dH = 0$  .

L'abaissement de température en fonction de la pression peut être caractérisé par un coefficient  $m_{j-T}$  tel que  $m_{j-T} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_h$  coefficient JOULE -THOMSON qui se calcul comme

suit :

$$dH = d(U + PV) = dU + PdV + VdP = 0$$

L'expression  $dU + PdV$  représente  $dQ$  (principe de l'équivalence), d'ou :

$$dH = dQ + VdP = 0$$

Par ailleurs, en prenant T et P comme variables indépendantes, on a :

$$dQ = Cp dT + h dP$$

Avec  $C_p = \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p$  : Chaleur spécifique à pression constante.

$h = \left( \frac{\partial Q}{\partial P} \right)_T$  : Chaleur de compression isotherme.

D'où  $C_p dT + (h + V)dP = 0$

Et  $m_{j-T} = -\frac{h + V}{C_p}$

Le coefficient  $h$  peut s'exprimer de différentes façons, et notamment

$$h = -T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

D'où l'expression du coefficient  $m_{j-T}$

$$m_{j-T} = \frac{T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V}{C_p}$$

Les gaz réels, leur coefficient est en général positif et les gaz se refroidissent par détente, mais l'inverse peut être vrai selon les valeurs respectives de  $T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$  et de  $V$ .

#### 4.4.2 Détente adiabatique : [5], [29],[35]

La deuxième méthode pour produire les basses températures ; c'est la détente adiabatique du gaz à travers une machine d'expansion, pour ce cas idéal la détente est réversible et adiabatique (isentropique) , on définit alors un coefficient de détente isentropique

$$m_s = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_s$$

Qui exprime le changement de la température dû au changement de la pression à entropie constante

Ce coefficient se calcule comme suit :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = -\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_P \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P = \frac{\partial Q}{T} \frac{1}{dT} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_P = \frac{C_p}{T}$$

d'où :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_P = T \left(\frac{\partial T}{\partial Q}\right)_P = \frac{T}{C_p}$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = \frac{\partial Q}{T} \cdot \frac{1}{\partial P} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial Q}{\partial P}\right)_T$$

le terme :

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial P}\right)_T = h = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

d'où :

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

alors

$$m_s = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \frac{T}{C_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

Les deux facteurs  $\frac{T}{C_p}$  et  $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$  sont toujours positifs donc  $m_s$  est toujours positif ; la détente avec travail extérieur provoque toujours, à l'inverse de la précédente, le refroidissement du gaz traité.

On pouvait d'ailleurs s'y attendre car le travail produit par le système est, en vertu du principe de l'équivalence compensé par diminution d'énergie interne, donc de la température.

La détente isentropique, pour une même température de départ et entre deux pressions données, provoque un abaissement de température plus important que la détente isenthalpique,

(Le coefficient  $J-T$  :  $m_{J-T} = \frac{V}{C_p} - \frac{T}{C_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$  est plus petit que le coefficient  $m_s = \frac{T}{C_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$  )

Elle est donc plus intéressante, mais son emploi est toujours combiné avec celle-ci car il n'est pas possible, pour des raisons technologiques, d'admettre la présence de liquide dans les machines de détente.

## 4.5 L'air

### 4.5.1 Propriétés de l'air

Les gaz de l'air, plus communément appelés « gaz industriels » font partie de notre vie quotidienne et concernent toutes les industries. [33]

Tout a commencé avec l'électrolyse de l'eau afin d'en extraire l'oxygène pour une utilisation médicale .la première clientèle était donc constituée de pharmaciens. Cela se passait dans les années 1890.

Peu de temps après 1895, deux méthodes développées en parallèle par CARLVAN LINDE et GEORGES CLAUDE ont abouti à la production industrielle d'air liquide puis d'azote et d'oxygène.

L'air que nous respirons est majoritairement constitué d'azote (78.09%), d'oxygène(20.95%)et d'argon(0.93%), l'observation des caractéristiques physiques et l'application du principe de détente des gaz ont permis la liquéfaction de l'air , puis la séparation de ses principaux composants ,en effet, l'azote, l'oxygène et l'argon ont une température de liquéfaction différente . il est donc possible de les séparer par distillation fractionnée .on peut ainsi obtenir des séparations très efficaces et des gaz de grande pureté.

L'air en tant que mélange de gaz et ses composants ( $H_e, H_2, N_e, N_2, CO, Ar, O_2, CH_4, Kr$ ) en tant que corps purs font partie de la catégorie des gaz dit « permanents ».

On appelle gaz permanent « tout gaz qui ne peut se liquéfier par simple augmentation de pression »[Larousse, 1972]

Dans un langage scientifique, on dirait « tout gaz dont la température critique est inférieure à la température ambiante ».

**Tableau 4.1 conditions critiques des gaz permanents**

Nom et symbole		Point Critique	
		T[c°]	P[bar]
Hélium	$He$	-267.95	2.275
Hydrogène	$H_2$	-239.91	12.38
Néon	$N_e$	-228.75	27.56
Azote	$N_2$	-146.95	34.00
Air		-140.73	37.74
Monoxyde de Carbone	$CO$	-140.24	34.99
Argon	$Ar$	-122.00	48.98
Oxygène	$O_2$	-118.57	50.43
Méthane	$CH_4$	-82.62	45.96
Krypton	$Kr$	-63.75	55.02

En plus des constituants déjà cités, l'air se compose : **de la vapeur d'eau**, qui se trouve à une teneur variable, suivant les conditions météorologiques, et sous plusieurs formes : vapeur, gouttelettes en suspension, particules de glace.

**Des impuretés :**

1°) **Des polluants** : tels que les hydrocarbures (méthane, éthane, éthylène, propane.....)

2°) **Des gaz acides** : tel que  $H_2S, SO_2, HCl, SO_3, CO$ .....qui sont des agents corrosifs pour les métaux.

3°) **Bactéries et poussières**

**4.5.2 Propriétés et utilisations de l'azote et de l'oxygène**

**4.5.2.1 L'oxygène :**

L'oxygène est un gaz dans les conditions ordinaires 15°C et 760 mm Hg, l'oxygène est un gaz indispensable à la vie, il est incolore, sans odeur, et sans saveur, à la pression atmosphérique pour des températures inférieures à - 183° c, c'est un liquide bleu pâle

C'est un gaz très réactif qui se combine directement à la plupart des éléments pour former des oxydes.

**Propriétés physiques :**

formule chimique O<sub>2</sub>

Numéro atomique Z= 8

Masse molaire 31.9987 g/ mole

**Propriétés biologiques :**

L'oxygène est le gaz nécessaire à la vie. Dans l'air que nous respirons, il représente 20.94% en volume, le reste étant constitué d'azote, argon, etc.

Des atmosphères sous - oxygénées (moins de 17 % en volume d'oxygène) entraînent des dommages graves, pouvant conduire à la mort par asphyxie si la teneur en oxygène se raréfie (moins de 12 % en volume).

Il faut cependant rappeler que contrairement à l'opinion couramment répandue, une atmosphère sous - oxygénée ne provoque pas chez un individu en bonne santé, de gêne respiratoire ou d'impression d'étouffement sensible, mais se manifeste par des caractères mineurs, qui sont à peu près ceux des périodes de débuts d'anesthésie (troubles de l'équilibre, vertiges,.....) Si

L'atmosphère contient moins de 7% en volume d'oxygène, l'asphyxie est très rapide, sans symptômes annonciateurs.

On peut par contre, à la pression ambiante, respirer sans danger des atmosphères contenant jusqu'à 75 % volume d'oxygène (sans danger pour l'organisme, mais avec de très gros risques d'inflammation des matières organiques). Pour des teneurs supérieures à 75 % en volume, les symptômes d'hyperoxie apparaissent : Crampe, nausées, hypothermie, amblyopie, gêne respiratoire, bradycardie, syncope, Crise convulsive pouvant entraîner la mort.

#### **4.5.2.2 l'azote**

L'azote est un gaz dans les conditions ordinaires 15 °c et 760 mmHg. L'azote est un gaz incolore, sans odeur et sans saveur. C'est le composant principale de l'air (78.08 % en volume)

A la pression atmosphérique, pour des températures à – 196°c ; c'est un liquide incolore, un peu plus léger que l'eau.

L'azote ne peut entraîner ni la respiration, ni la combustion, mais joue un rôle essentiel en tant qu'élément de la matière. C'est un gaz ininflammable.

L'azote est livré soit gazeux sous pression dans des bouteilles, soit liquide à basse température sous sa propre pression de vapeur saturante.

#### **Propriétés physiques :**

formule chimique  $N_2$   
Numéro atomique  $Z= 7$   
Masse molaire 28.0134 g / mole

#### **Propriétés biologiques :**

L'azote est un gaz physiquement inerte, non toxique. Par déplacement de l'oxygène de l'air, il peut avoir des effets nocifs sur l'organisme en réduisant la pression partielle de l'oxygène dans les poumons et agir comme asphyxiant.

Les domaines d'utilisation des gaz industriels sont donnés dans le tableau suivant

**Tableau 4.2 Domaines d'utilisation des gaz industriels**

Domaine d'activité	Exemples d'application	Apport des gaz industriels	Principaux gaz utilisés
Soudage/Coupage	Fabrication de produits Mécano soudé	Amélioration de la productivité, de la qualité De assemblages et du confort opératoire	Acétylène Argon Azote Oxygène
Laboratoire	Analyses sur des appareils de mesure : absorption atomique, torche plasma, chromatographie...	Fiabilité des analyses grâce à des étalonnages de précision	Argon Azote Gaz purs & Mélanges Oxygène
Agro-alimentaire	Surgélation, enrobage de produits IQF (Individual Quick Frozen produits alimentaires surgelés individuellement), refroidissement, préparation De charcuteries, plats cuisinés... Protection des jus de fruits	Augmentation de la DIC (date limite de consommation), préservation des qualités aromatiques, gustatives et physiques des aliments	Azote Dioxyde de carbone
Environnement	Piégeage des COV (composés organique volatils), refroidissement des fluides process, neutralisation des effluents, dopage des stations d'épuration	Optimisation des installations (stations d'épuration par exemple), respect de l'environnement	Azote Dioxyde de carbone Oxygène
Chimie	Inertage, ébavurage, cryobroyage	Sécurilisation des installations, transferts sous gaz inerte, finition des pièces caoutchouc et plastique, micronisation	Azote Dioxyde de carbone
Métallurgie	Production d'atmosphères pour le traitement thermique, dopage des fours verriers, inertage des composants électroniques pour le brasage	Amélioration des propriétés mécaniques des pièces Augmentation de la productivité Protection contre l'oxydation des composants	Azote Hydrogène Oxygène

# **Chapitre 5**

**Modèle de Simulation**

**De cycle de CLAUDE**

**Pour la liquéfaction de l'air,  
de L'oxygène et de l'azote**

### 5.1 Paramètres d'opération d'un système de liquéfaction :

Pour l'investigation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'oxygène et de l'azote, trois paramètres d'opération ont été considérés pour minimiser le travail absorbé et maximiser la quantité liquéfiée :

1. La pression à la sortie du compresseur.
2. La température à l'entrée de la turbine de détente (expandeur)
3. La fraction du gaz passant par l'expandeur.

### 5.2 Paramètres de performance d'un système de liquéfaction :

Quatre fonctions qui peuvent indiquer la performance d'un système de liquéfaction

**1<sup>ère</sup> fonction** : le travail nécessaire à la compression d'une unité de masse du gaz

$$-W/m$$

**2<sup>ème</sup> fonction** : le travail nécessaire à la liquéfaction d'une unité de masse du gaz

$$-W/mf$$

**3<sup>ème</sup> fonction** : la fraction liquéfiée

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

**4<sup>ème</sup> fonction** : le rapport entre le travail théorique minimum et le travail réel nécessaire pour le système appelé le rendement thermodynamique

Noté 
$$FOM = \frac{-W_i/m}{-W/mf} \quad 0 < FOM < 1$$

Ce rapport donne la mesure d'approche de performance du système réel au système idéal.

### 5.3 Les paramètres qui influent sur la performance d'un système réel.

1. rendement adiabatique du compresseur et de l'expandeur.
2. rendement mécanique du compresseur et de l'expandeur.

3. l'efficacité des échangeurs de chaleur.
4. la chute de pression à travers les tubes et les échangeurs de chaleur.
5. le transfert de chaleur du système au milieu environnant.

#### 5.4 Calcul thermodynamique

Pour établir le modèle de simulation, les hypothèses suivantes sont considérées

1. admettant que le gaz à liquéfier (air, azote, oxygène) est un gaz parfait
2. le transfert de chaleur vers l'extérieur est nul
3. les énergies potentielle et cinétique sont négligeables devant l'enthalpie.
4. le système possède une seule entrée et une seule sortie.
5. aucune perte de charge à travers les tubes ni les échangeurs de chaleur.
6. la chaleur spécifique ne varie pas avec la température.
7. admettant que toutes les transformations sont réversibles.

Pour le déroulement du calcul, certains paramètres thermodynamiques sont fixés ou tirés à partir des diagrammes spécialisés, par contre d'autres sont calculés.

##### 5.4.1 Les paramètres connus (donnés).

Quelques paramètres sont donnés par l'utilisateur tels que :

Les paramètres à l'entrée du compresseur (point figuratif 1)

- la pression  $P_1$  ( $P_1 = 1 \text{ atm}$ , soit  $1.013 \text{ bar}$ )

- la température ( $T_1 = 300K$ )

- la masse du gaz à liquéfiée notée ( $m = 1Kg$ )

- la masse molaire « M » et la chaleur spécifique « CP » de chaque gaz en étude :

§ pour l'air,  $M = 28.97 \text{ [Kg/Kmole]}$ ,  $C_p = 1.0057 \text{ [Kj/Kg.K]}$

§ pour l'oxygène,  $M = 32 \text{ [Kg/Kmole]}$ ,  $C_p = 0.921 \text{ [Kj/Kg.K]}$

§ pour l'azote,  $M = 28 \text{ [Kg/Kmole]}$ ,  $C_p = 1.042 \text{ [Kj/Kg.K]}$

- la constante des gaz parfaits ( $R = 8.314 \frac{kJ}{k.kmole}$ )

#### 5.4.2 Les paramètres tirés à partir des diagrammes :(Annexe 2)

Pour les trois gaz (air, azote et l'oxygène) on a utilisé des diagrammes (T-S) pour la détermination des enthalpies et des entropies, telles que :

- L'enthalpie  $h_1 [kJ/kg]$  à l'entrée du compresseur,
- L'entropie  $S_1 [kJ/kg.k]$  à l'entrée du compresseur,
- L'enthalpie  $h_f [kJ/kg]$  du liquide saturé à la pression atmosphérique, ainsi que son entropie  $S_f [kJ/kg.k]$ .
- L'enthalpie  $h_g [kJ/kg]$  de la vapeur saturée à la pression atmosphérique.

#### 5.4.3 Les paramètres à calculer :

##### 5.4.3.1 les enthalpies :

On a [36] 
$$h = u + Pv \quad 5.1$$

Dérivant l'équation 5.1, on obtient :

$$dh = du + Pdv + vdP \quad 5.2$$

Sachant que d après le premier principe de la thermodynamique [36]

$$du = dq - Pdv \quad 5.3$$

et le deuxième principe donne

$$dq = Tds \quad 5.4$$

D'ou l'équation 5.2 devient :

$$dh = Tds + vdP \quad 5.5$$

Selon la loi des gaz parfaits [28] on a

$$PV = nRT \quad 5.6$$

Faisant sortir le volume  $v$  en fonction de la pression  $p$  et la température  $T$  :

$$V = \frac{nRT}{P} \quad 5.7$$

Sachant que

$$n = m/M$$

D'où l'équation 5.7 devient :

$$V = \frac{mRT}{M} \cdot \frac{1}{P} \quad 5.8$$

Alors l'équation 5.5 devient :

$$dh = TdS + \frac{mRT}{M} \frac{dP}{P} \quad 5.9$$

#### 5.4.3.2 Les entropies :

Si l'entropie est donnée en fonction de la température et de la pression, elle peut s'écrire sous la forme différentielle suivante [36] :

$$S(T, P) \quad dS = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_P dT + \left( \frac{\partial S}{\partial P} \right)_T dP \quad 5.10$$

Sachant que [35], [36]

$$C_p = T \left( \frac{dS}{dT} \right)_P$$

D'après la relation de Maxwell [35],[36]

$$\left( \frac{dS}{dP} \right)_T = - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

Le Coefficient de dilatation thermique isobare  $a$  est donné par :  $a = \frac{1}{V} \left( \frac{dV}{dT} \right)_P$

Pour le Cas d'un gaz parfait [28]

$$a = \frac{1}{T}$$

D'où l'équation 5.10 devient :

$$dS = \frac{C_p}{T} dT - \frac{V}{T} dP \quad 5.11$$

Et 
$$V = \frac{mRT}{M P}$$

L'équation 5.11 devient : 
$$dS = \frac{CP}{T} dT - \frac{mR}{M} \frac{dP}{P} \quad 5.12$$

### 5.4.3.3 le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée $\left(-\frac{W}{m}\right) [kj/kg]$

La première loi de la thermodynamique est donnée par

$$j_{net} - W_{net} = \sum_{sortie} m \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{entree} m \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad 5.13$$

Avec  $\phi_{net}$  : la quantité de chaleur transférée du / au système

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

$h$  : l'enthalpie

$v^2/2$  : l'énergie cinétique (  $v$  : vitesse du fluide)

$gz$  : l'énergie potentielle (  $z$  : c'est la côte d'élévation du fluide à partir d'un plan de référence)

(  $g$  : accélération de la pesanteur  $9.806 \text{ m/s}^2$  )

Si on l'applique à l'ensemble du cycle, sauf le compresseur d'entrée et tenant en compte des hypothèses (2, 3,4) citées au paragraphe 5.4

L'équation 5.13 devient : 
$$-W_e = (m - m_f)h_1 + m_f h_f - mh_2 \quad 5.14$$

Avec  $W_e$  : c'est le travail fourni par l'expandeur  $[Kj]$

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

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

$h_f$  : l'enthalpie du liquide saturé  $[Kj/Kg]$

En appliquant la 1<sup>ère</sup> loi de la thermodynamique pour l'expandeur uniquement :

$$-W_e = m_e (h_e - h_3) \quad 5.15$$

$m_e$  : La masse du gaz qui passe par l'expandeur [Kg]

$h_3$  : L'enthalpie à l'entrée de l'expandeur [Kj/Kg]

$h_e$  : L'enthalpie à la sortie de l'expandeur [Kj/Kg]

Si le travail produit par la détente est utilisé pour aider à la compression [29], le travail nécessaire pour l'unité de masse du gaz comprimée est donné par :

$$-\frac{w}{m} = [T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)] - X(h_3 - h_{e'}) \quad 5.16$$

Avec  $X = \frac{m_e}{m}$  la fraction du gaz passant par l'expandeur

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

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

$S_2$  : L'entropie à la sortie du compresseur [Kj/Kg.K]

$h_{e'}$  : L'enthalpie réelle à la sortie de l'expandeur [kj/Kg]

#### 5.4.3.4 la fraction y du gaz liquéfiée :

En combinant les équations 5.14 et 5.15, on obtient :

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + x \frac{h_3 - h_{e'}}{h_1 - h_f} \quad 5.17$$

Avec  $y = \frac{mf}{m}$

#### 5.4.3.5 le travail nécessaire par l'unité de masse du gaz liquéfiée $-W/m_f$ [Kj/Kg]

Ce travail est donné comme suit :

$$-\frac{W}{mf} = \frac{T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) - X(h_3 - h_{e'})}{\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + X \frac{h_3 - h_{e'}}{h_1 - h_f}} \quad 5.18$$

#### 5.4.3.6 le rendement thermodynamique FOM

Il est donné [29] :

$$\text{FOM} = \frac{-W_{\&}/m}{-W/m_f} \quad 5.19$$

Avec  $-W_i/m$  : c'est le travail théorique minimum [Kj/Kg] d'un cycle idéal (chapitre 3) auquel on applique la 1<sup>ère</sup> loi de la thermodynamique.

L'équation 5.13 devient :

$$Q_R - W_i = m(h_f - h_i) = -m(h_i - h_f) \quad 5.20$$

En appliquant la 2<sup>ème</sup> loi de la thermodynamique [36], on écrit :

$$Q_R = mT_i(S_2 - S_1) = -mT_i(S_i - S_f) \quad 5.21$$

Car  $S_2 = S_f$

En substituant  $Q_R$  de l'équation 5.21 dans l'équation 5.20, on peut déterminer le travail nécessaire pour le système idéal [5].

$$-W_i/m = T_i(S_i - S_f) - (h_i - h_f) = -W_i/m_f \quad 5.22$$

Pour le système idéal, la totalité du gaz comprimé est liquéfiée

Donc :  $m = m_f$  et  $y = 1$

Le travail net nécessaire est négatif. (Absorbé par le système), donc le terme  $-W_i/m_f$  est un nombre positif.

L'équation 5.22 donne le travail minimum nécessaire pour liquéfier le gaz, c'est cette valeur que n'importe quel système pratique doit s'approcher.

**Le tableau 5.1** suivant [29] donne le travail idéal de certains gaz à T=300K et P= 101.3KPa

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 <sub>2</sub>	20.27	12019
Néon Ne	27.09	1335
Azote N <sub>2</sub>	77.36	768.1
Air	78.8	738.9
Argon Ar	87.28	478.6
Oxygène O <sub>2</sub>	90.18	635.6

#### 5.3.4.7 les rendements des composants du système :

\* **Le rendement global du compresseur  $R_{cp}$**

Il est donné par [29] :  $R_{cp} = R_{cpT} \cdot R_{cpMC}$  5.23

Où  $R_{cpT}$  : le rendement isotherme du compresseur

$$R_{cpT} = \frac{(w/m)_{T=cte}}{(w/m)_{ind}} \quad 5.24$$

Avec  $(w/m)_{T=c}$  : le travail nécessaire pour le processus de compression isotherme et réversible

$(w/m)_{ind}$  : Le travail indiqué pour la compression

Et  $R_{cpMC}$  : le rendement mécanique du compresseur

**\* le rendement global de l'expandeur :**

Il est donné par :  $R_{exp} = R_{exad} \cdot R_{exMC}$  5.26

Avec  $R_{exad}$  : le rendement isentropique de l'expandeur

$$R_{exad} = \frac{(h_3 - h_e)_{réel}}{(h_3 - h_e)_{ad}} \quad 5.27$$

Avec le numérateur qui présente la diminution réelle de l'enthalpie durant l'expansion et le dénominateur c'est la diminution de l'enthalpie durant le processus d'expansion adiabatique réversible.

$R_{exMC}$  : Le rendement mécanique de l'expandeur

$$R_{exMC} = \frac{(w/m)_{réel}}{(h_3 - h_e)_{réel}} \quad 5.28$$

**\*L'effet des rendements du compresseur et de l'expandeur sur la performance du système**

On constate que le rendement global du compresseur n'a pas d'effet sur le liquide produit par contre le travail nécessaire est directement lié à ce coefficient [29]

$$-\frac{w}{m_f} = \frac{1}{yRcp} [T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)] \quad 5.29$$

Le travail réel du compresseur est proportionnellement inverse au rendement.

D'autre part le rendement de l'expandeur a un effet sur la quantité liquéfiée et sur le travail nécessaire .Le rendement adiabatique de l'expandeur a un effet sur la différence d'enthalpie au cours de l'expansion :

$$\Delta h_{réel} = (h_3 - h_{e'}) \quad 5.30$$

$$(h_3 - h_{e'}) = R_{exad} (h_3 - h_e) \quad 5.31$$

Donc, si on prend en considération l'effet de ce coefficient, l'équation 5.17 devient :

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + x.R_{exad} \frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f} \quad 5.32$$

L'équation 5.16 devient :

$$-\frac{w}{m} = \frac{[T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)]}{R_{cp}} - x.(w/m)_{réel} \quad 5.33$$

De l'équation 5.28 on aura :

$$-\frac{w}{m} = \frac{[T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)]}{R_{cp}} - x.R_{exMC} \cdot (h_3 - h_e) \quad 5.34$$

Alors l'équation 5.27 on aura

$$-\frac{w}{m} = \frac{[T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)]}{R_{cp}} - x.R_{exMC} R_{exad} (h_3 - h_e) \quad 5.35$$

$$-\frac{w}{m} = \frac{[T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)]}{R_{cp}} - x.R_{ex} (h_3 - h_e) \quad 5.36$$

### **\*l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur la performance du système.**

Pour n'importe quel système de liquéfaction, l'échangeur de chaleur à un rôle important dans sa performance [29].

Le coefficient de performance de l'échangeur est donné par :

$$R_E = \frac{\text{energie réellement transféré}}{\text{maximum d'energie transféré}} \quad 5.37$$

Donc :

$$R_e = \frac{h_1' - h_g}{h_1 - h_g} \quad 5.38$$

Avec  $h_1'$  : l'enthalpie réelle à la sortie du dernier échangeur [Kj/Kg]

$h_g$  : L'enthalpie du gaz saturé à la pression atmosphérique [Kj/Kg]

On tire  $h_1'$  de l'équation 5.38

$$h_{1'} = h_1 R_e + (1 - R_e) h_g \quad 5.39$$

La quantité liquéfiée  $y$  sera

$$y = \frac{mf}{m} = \frac{h_{1'} - h_2}{h_{1'} - h_f} + x R_{exad} \frac{h_3 - h_e}{h_{1'} - h_f} \quad 5.40$$

On remplace  $h_{1'}$  par sa valeur dans l'équation 5.40

$$y = \frac{(h_g - h_2) + (h_1 - h_g) R_e + R_{exad} (h_3 - h_e)}{(h_g - h_f) + (h_1 - h_g) R_e} \quad 5.41$$

Pour un rendement égal à :

$$R_{e_{cri}} = \frac{h_2 - h_g}{h_1 - h_g} - x R_{exad} \frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_g} \quad 5.42$$

C'est-à-dire qu'il existe une valeur minimale (critique) du coefficient de performance de l'échangeur de chaleur  $R_{e_{cri}}$  au-dessous de cette valeur on aura aucune quantité du gaz qui sera liquéfiée.

**\*L'influence de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur le travail nécessaire de tout le système.**

Le travail supplémentaire nécessaire pour le système qui est dû à l'efficacité de l'échangeur est donné par :

$$-W_{sup} = m(h_1 - h_{1'}) \quad 5.43$$

Et on a : 
$$h_{1'} = h_1 R_e + (1 - R_e) h_g$$

On remplace  $h_{1'}$  par sa valeur dans l'équation 5.43, on obtient

$$-W_{Sup} = m(1 - R_e)(h_1 - h_g) \quad 5.44$$

L'augmentation du travail nécessaire est directement liée à la diminution de l'efficacité de l'échangeur.

Donc le travail nécessaire de tout le système sera :

$$(-W/m)_{réel} = (-W/m) + (-W_{sup}/m) \quad 5.45$$

**Avec  $(-W/m)$  :** c'est le travail nécessaire du système pour une efficacité de l'échangeur qui est égale à l'unité.

### 5.5 Algorithme et organigramme de calcul :

basant sur les relations thermodynamiques établies et afin d'éviter un calcul manuel rigoureux on fait, alors, appel à la machine en établissant un programme développé en langage FORTRAN dont l'algorithme ci-après va permettre de suivre les séquences de calcul des paramètres cherchés .

1<sup>er</sup> : Introduction des valeurs des paramètres du gaz à l'entrée du compresseur

( pression , température , entropie ,enthalpie) la chaleur spécifique du gaz ainsi que sa masse molaire, la constante du gaz parfait , les paramètres du liquide saturé (enthalpie , entropie ) , l'enthalpie de la vapeur saturée , le rendement global du compresseur , le rendement adiabatique de l'expandeur , la température à la sortie du compresseur .

2<sup>ème</sup> : Si on tape sur 1, on fait varier la température  $T_3$  à l'entrée de l'expandeur, tout en fixant la fraction  $x$  du gaz passant par l'expandeur. Si on tape 2, on varie la fraction  $x$  et en fixant la température  $T_3$

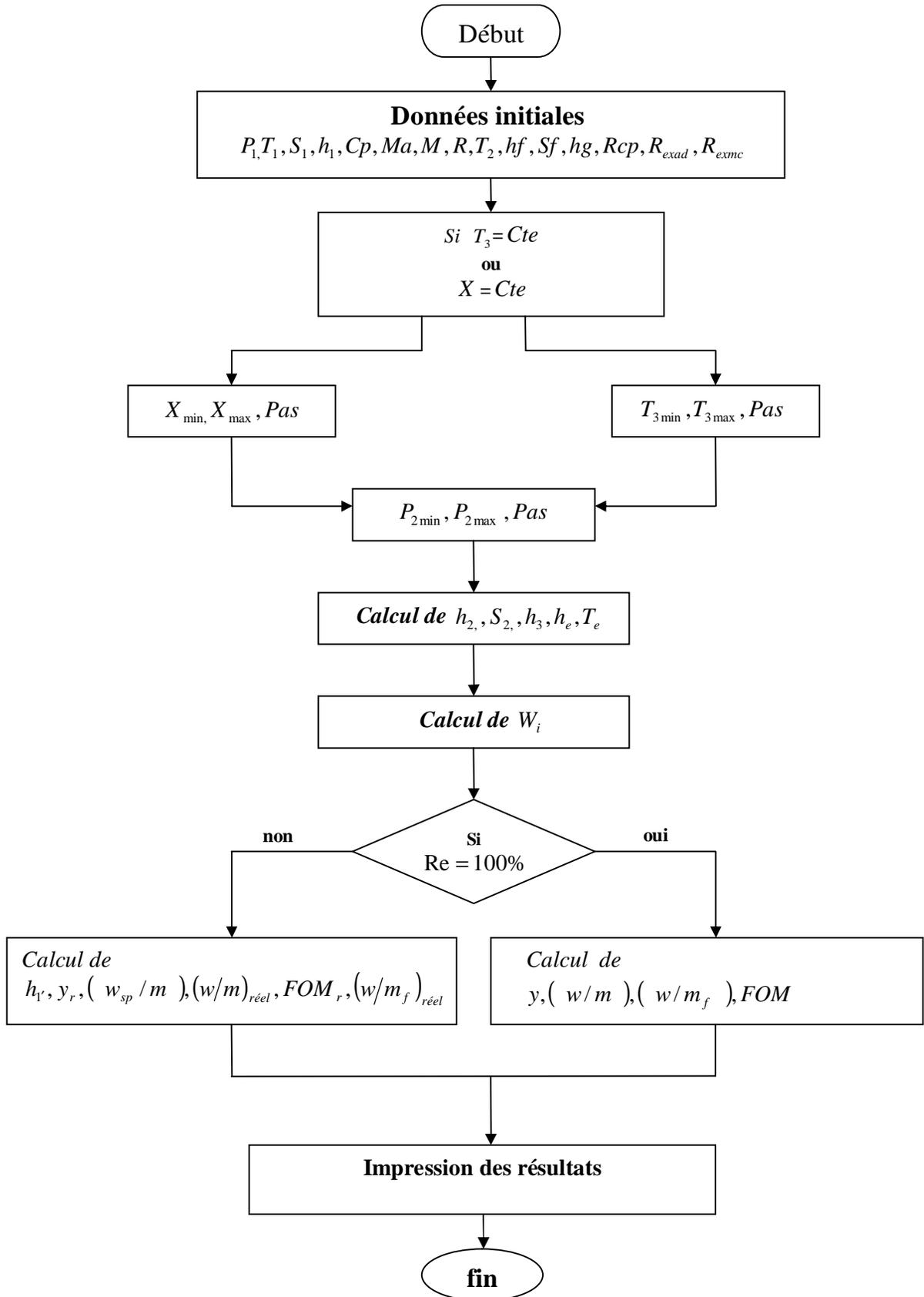
3<sup>ème</sup> : On fait varier la pression  $P_2$  à la sortie du compresseur.

4<sup>ème</sup> : Appliquons les équations thermodynamiques, on calcule l'enthalpie, l'entropie à la sortie du compresseur et l'expandeur ainsi que le travail théorique.

5<sup>ème</sup> : On calcule la quantité liquéfiée, le travail nécessaire à la compression d'une unité de masse, le travail nécessaire à liquéfie une unité de masse et le rendement thermodynamique ceux correspond au rendement de l'échangeur thermique égale à 100%

6<sup>ème</sup> : Si le rendement de l'échangeur thermique est différent de 100%, on doit calculé la fraction réellement liquéfiée, l'enthalpie réelle à la sortie de l'échangeur, le travail supplémentaire fourni pour la compression, le travail réel nécessaire à la compression et à la liquéfaction d'une unité de masse du gaz ainsi que le rendement thermodynamique réel.

# Algorithme du programme de simulation de cycle de Claude



# **Chapitre 6**

## **Résultats et Discussion**

## 6.1 Présentation des résultats

Le modèle de simulation développé et décrit dans le chapitre précédent permet d'obtenir une série des résultats qui vont être représentés et discutés tout en comparant entre les trois gaz (air, azote, oxygène) en étude.

### 6.1.1 L'effet de la pression du gaz à la sortie du compresseur et de la température du gaz à l'entrée de l'expandeur sur les paramètres de performance

Dans ce premier cas, on étudié l'effet de la pression  $P_2$  à la sortie du compresseur et de la température  $T_3$  à l'entrée de l'expandeur sur les paramètres de performance du cycle, tout en prenant en considération les effets des rendements des différents appareils composants le système à savoir le rendement global du compresseur  $R_{cp}$ , les rendements adiabatique et mécanique de l'expandeur  $R_{ex}$  ainsi que le rendement de l'échangeur thermique  $R_e$ .

Les intervalles de variation de la pression  $P_2$  et de la température  $T_3$  sont :

$P_2$  varié de 1 [MPa] à 8 [MPa]

$T_3$  prend les valeurs de 198 [K] à 300 [K]

Pour la fraction  $X$  du gaz passant par l'expandeur est maintenue constante est égale à 0.54

#### a) L'effet sur le travail nécessaire à la liquéfaction d'une unité de masse du gaz $-w/m_f$

**1<sup>er</sup> cas** :  $R_{cp} = 100\%$  ,  $R_{ex} = 100\%$  ,  $R_e = 100\%$

Les résultats obtenus sont :

Pour l'air :  $-w/m_f$  varie de 720 à 1650 [ Kj/Kg ]

Pour l'oxygène:  $-w/m_f$  varie de 600 à 1600 [ Kj/Kg ]

Pour l'azote:  $-w/m_f$  varie de 700 à 1655 [ Kj/Kg ]

Selon les figures **6.1, a, b, c** , on constate que le travail  $-w/m_f$  varié d'une façon linéaire avec la pression  $P_2$  à la sortie du compresseur et inversement proportionnel à la température  $T_3$  à l'entrée de l'expandeur.

Dans ce cas, l'oxygène présente un travail minimal par rapport à l'air et à l'oxygène

**2<sup>ème</sup> cas** : pour savoir les effets des rendements du compresseur et de l'expandeur sur le travail on a pris les valeurs suivantes :  $R_{cp} = 70\%$  ,  $R_{ex} = 80\%$  ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air :  $w/m_f$  prend les valeurs de 1700 à 3400 [ Kj/Kg ]

Pour l'oxygène:  $w/m_f$  prend les valeurs de 1600 à 3210 [ Kj/Kg ]

Pour l'azote:  $w/m_f$  prend les valeurs de 1670 à 3445 [ Kj/Kg ]

Les résultats montrent (figures **6.1,d,e,f**) que l'effet de changement des rendements du compresseur et de l'expandeur est important, il influe considérablement sur l'augmentation du travail.

A titre d'exemple, pour l'air, le travail augmente de 720 [Kj/Kg] à 1700 [Kj/Kg] pour une pression  $P_2$  égale à 1 MPa

**3<sup>ème</sup> cas** : pour mettre en évidence l'effet du rendement de l'échangeur thermique sur le travail dans ce cas, on prend :  $R_{cp} = 70\%$  ,  $R_{ex} = 80\%$  ,  $R_e = 95\%$

Pour l'air :  $w/m_f$  varie de 2100 à 4200 [ Kj/Kg ]

Pour l'oxygène:  $w/m_f$  varie de 1900 à 3900 [ Kj/Kg ]

Pour l'azote :  $w/m_f$  varie de 2150 à 4195 [ Kj/Kg ]

Les figures **6.1,g,h,i** illustrent que le rendement de l'échangeur n'est pas négligeable, il influe d'une façon importante sur le travail, prenant le même exemple, le travail pour l'air augmente de 1700 [Kj/Kg] à 2100 [ Kj/Kg ] à pression  $P_2$  égale à 1 MPa

## **b) L'effet sur la fraction $y$ liquéfiée**

Reprenons les mêmes valeurs des rendements des différents appareils, on a

**1<sup>er</sup> cas** :  $R_{cp} = 100\%$  ,  $R_{ex} = 100\%$  ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air :  $y$  varie de 0.1200 à 0.2600

Pour l'oxygène:  $y$  varie de 0.1150 à 0.2500

Pour l'azote:  $y$  varie de 0.1360 à 0.2700

Les figures **6.2,a,b,c** montrent que la fraction  $y$  liquéfiée augmente avec l'augmentation de la pression  $P_2$  et de la température  $T_3$ .

Pour  $P_2$  égale à 8 MPa, la fraction  $Y$  égale à 0.2700 plus importante que celle de l'air et de l'oxygène.

**2<sup>ème</sup> cas** :  $R_{cp} = 70\%$  ,  $R_{ex} = 80\%$  ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air :  $y$  prend les valeurs de 0.095 à 0.2100

Pour l'oxygène:  $y$  prend les valeurs de 0.092 à 0.2000

Pour l'azote:  $y$  prend les valeurs de 0.1000 à 0.2150

On constate que la fraction  $y$  liquéfiée a diminué (Figures **6.2,d,e,f**) pour l'azote,  $y$  égale à 0.2150 à la même pression  $P_2$  égale à 8 MPa

**3<sup>ème</sup> cas** :  $R_{cp} = 70\%$  ,  $R_{ex} = 80\%$  ,  $R_e = 95\%$

Pour l'air :  $y$  est compris entre 0.070 et 0.1850

Pour l'oxygène :  $y$  est compris entre 0.073 et 0.1855

Pour l'azote :  $y$  est compris entre 0.072 et 0.1950

Les résultats montrent l'influence du rendement de l'échangeur thermique sur la fraction  $y$  liquéfiée (figures **6.2,g,h,i**) qui diminue quand le rendement baisse.

Pour un rendement critique  $R_{ecri}$  égale ou inférieur à 80%, le cycle de CLAUDE pour la liquéfaction de l'air ne donne aucune quantité liquéfiée ( $y=0$ )

### c) l'effet sur le rendement thermodynamique FOM

**1<sup>ère</sup> cas** :  $R_{cp} = 100\%$  ,  $R_{ex} = 100\%$  ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air : FOM varie de 1.100 à 0.4500

Pour l'oxygène: FOM varie de 1.000 à 0.4000

Pour l'azote: FOM varie de 1.110 à 0.4300

Les figures **6.3,a,b,c** illustrent que le rendement thermodynamique FOM prend des valeurs faibles quand la pression  $P_2$  augmente et la température  $T_3$  diminue.

Dans ce cas, on a obtenu un rendement qui dépasse l'unité, pour des pressions faibles, car c'est un cas théorique.

**2<sup>ème</sup> cas :**  $R_{cp} = 70\%$ ,  $R_{ex} = 80\%$ ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air : FOM prend les valeurs de 0.4600 à 0.2150

Pour l'oxygène: FOM prend les valeurs de 0.4200 à 0.2000

Pour l'azote: FOM prend les valeurs de 0.4700 à 0.2200

Le rendement thermodynamique est influencé par l'abaissement des rendements du compresseur et de l'expandeur (figures **6.3,d,e,f**), à titre d'exemple, l'azote présente un rendement FOM égal à 0,4700 plus important que ceux de l'air et de l'oxygène à la pression  $P_2$  égale à 1MPa.

**3<sup>ème</sup> cas :**  $R_{cp} = 70\%$ ,  $R_{ex} = 80\%$ ,  $R_e = 95\%$

Pour l'air : FOM est compris entre 0.3700 et 0.1750

Pour l'oxygène : FOM est compris entre 0.3400 et 0.1650

Pour l'azote : FOM est compris entre 0.3800 et 0.1800

Les Figures **6.3,g,h,i** montrent l'influence du rendement de l'échangeur sur l'abaissement du rendement thermodynamique, prenant le même exemple de l'azote son rendement qui diminue jusqu'à 0.3800 pour la même pression.

### 6.1.2 L'effet de la pression du gaz à la sortie du compresseur et de la fraction du gaz passant par l'expandeur sur les paramètres de performance

Reprenant le même intervalle pour la pression  $P_2$ , variant la fraction X de 0.50 à 0.70, en fixant la température  $T_3$  à 294 K, les résultats obtenus sont :

a) l'effet sur le travail ( $w/m_f$ ) nécessaire à la liquéfaction d'une unité de masse du gaz.

**1<sup>er</sup> cas :**  $R_{cp} = 100\%$  ,  $R_{ex} = 100\%$  ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air :  $w/m_f$  est compris entre 450 et 1100 [ Kj/Kg ]

Pour l'oxygène:  $w/m_f$  est compris entre 425 et 1040 [ Kj/Kg ]

Pour l'azote:  $w/m_f$  est compris entre 454 et 1110 [ Kj/Kg ]

Les résultats montrent que le travail prend des valeurs considérables quand la fraction X du gaz passant par l'expandeur diminue (figures **6.4,a,b,c**)

Dans ce cas, l'oxygène présente un travail minimal 425 [Kj/Kg] par rapport à l'air et l'azote.

**2<sup>eme</sup> cas :**  $R_{cp} = 70\%$  ,  $R_{ex} = 80\%$  ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air :  $w/m_f$  est compris entre 1200 et 2350 [ Kj/Kg ]

Pour l'oxygène:  $w/m_f$  est compris entre 1100 et 2250 [ Kj/Kg ]

Pour l'azote:  $w/m_f$  est compris entre 1250 et 2400 [ Kj/Kg ]

Même constat que précédemment, si les rendements du compresseur et de l'expandeur diminuent , le travail augmente (figures **6.4,d,e,f**)

A titre d'exemple,  $w/m_f$  égal à 1100 [Kj/Kg] pour l'oxygène plus petit que ceux de l'air et l'azote.

**3<sup>eme</sup> cas :**  $R_{cp} = 70\%$  ,  $R_{ex} = 80\%$  ,  $R_e = 95\%$

Pour l'air :  $w/m_f$  varie de 1400 à 2725 [ Kj/Kg ]

Pour l'oxygène:  $w/m_f$  varie de 1300 à 2555 [ Kj/Kg ]

Pour l'azote:  $w/m_f$  varie de 1450 à 2750 [ Kj/Kg ]

On constate que le travail augmente (figures **6.4,g,h,i**), pour l'oxygène est égal à 1300 [Kj/Kg] par rapport au deuxième cas, il est important.

**b) L'effet sur la fraction  $y$  liquéfiée :**

**1<sup>er</sup> cas :**  $R_{cp} = 100\%$  ,  $R_{ex} = 100\%$  ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air :  $y$  prend les valeurs de 0.1650 à 0.3350

Pour l'oxygène:  $y$  prend les valeurs de 0.1555 à 0.3200

Pour l'azote:  $y$  prend les valeurs de 0.1700 à 0.3450

La fraction  $y$  liquéfiée augmente quand la fraction  $X$  augmente (figures **6.5,a,b,c**).

Dans ce cas, l'azote présente une fraction liquéfiée importante égale à 0.3450 par rapport à l'air et à l'oxygène.

**2<sup>eme</sup> cas :**  $R_{cp} = 70\%$  ,  $R_{ex} = 80\%$  ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air :  $y$  prend les valeurs de 0.1325 à 0.2650

Pour l'oxygène:  $y$  prend les valeurs de 0.1250 à 0.2600

Pour l'azote:  $y$  prend les valeurs de 0.1350 à 0.2750

Si les rendements du compresseur et de l'expandeur diminuent, la fraction diminue (figures **6.5,d,e,f**), pour le cas de l'azote,  $y$  prend une valeur moins importante 0.2750 par rapport au cas précédent.

**3<sup>eme</sup> cas :**  $R_{cp} = 70\%$  ,  $R_{ex} = 80\%$  ,  $R_e = 95\%$

Pour l'air :  $y$  est compris entre 0.1091 et 0.2561

Pour l'oxygène :  $y$  est compris entre 0.1059 et 0.2464

Pour l'azote :  $y$  est compris entre 0.1119 et 0.2624

Les figures **6.5,g,h,i** montrent toujours l'influence du rendement de l'échangeur thermique sur la fraction liquéfiée.

**c) l'effet sur le rendement thermodynamique FOM**

**1<sup>er</sup> cas :**  $R_{cp} = 100\%$  ,  $R_{ex} = 100\%$  ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air : FOM varie de 1.7000 à 0.6500

Pour l'oxygène: FOM varie de 1.6000 à 1.0203

Pour l'azote: FOM varie de 1.8000 à 0.6700

On remarque selon les figures **6.6,a,b,c** que le rendement thermodynamique FOM prend des valeurs faibles quand la fraction X du gaz qui passe par l'expandeur est faible.

Comme les rendements des appareils sont présent égal à 100%, un cas théorique, on a obtenu un rendement thermodynamique qui dépasse l'unité.

**2<sup>eme</sup> cas :**  $R_{cp} = 70\%$  ,  $R_{ex} = 80\%$  ,  $R_e = 100\%$

Pour l'air : FOM prend les valeurs de 0.6050 à 0.3100

Pour l'oxygène: FOM prend les valeurs de 0.5550 à 0.2550

Pour l'azote: FOM prend les valeurs de 0.6500 à 0.3200

On prend un exemple, l'azote présente un rendement thermodynamique égal à 0.6500 plus important que présentent l'air et l'oxygène (figures **6.6,d,e,f**).

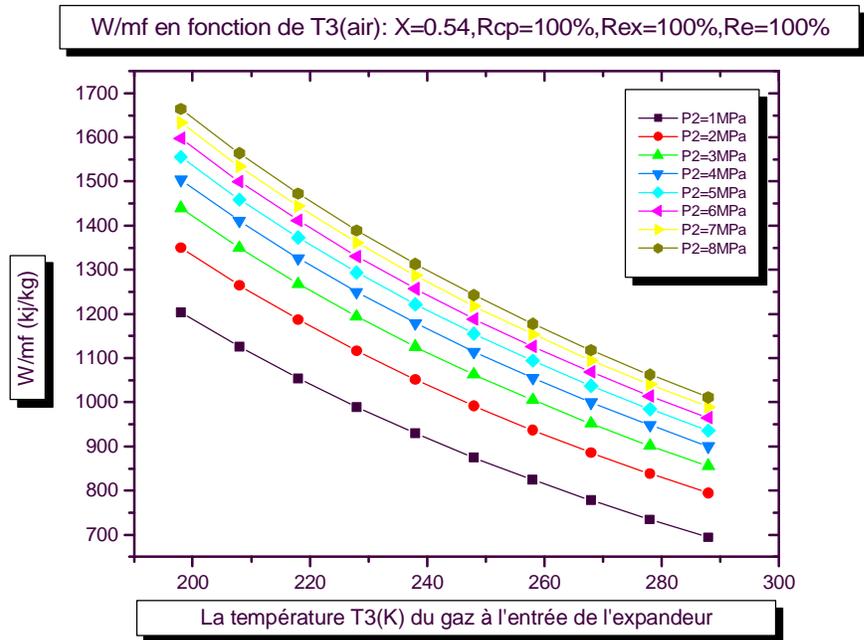
**3<sup>eme</sup> cas :**  $R_{cp} = 70\%$  ,  $R_{ex} = 80\%$  ,  $R_e = 95\%$

Pour l'air : FOM est compris entre 0.5050 et 0.2540

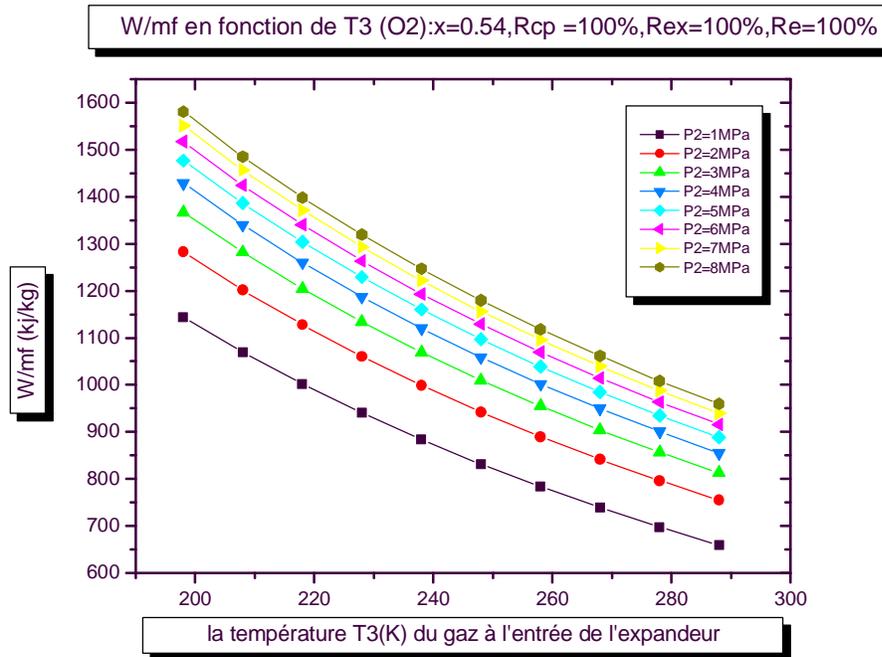
Pour l'oxygène : FOM est compris entre 0.4550et 0.2500

Pour l'azote : FOM est compris entre 0.5070 et 0.2550

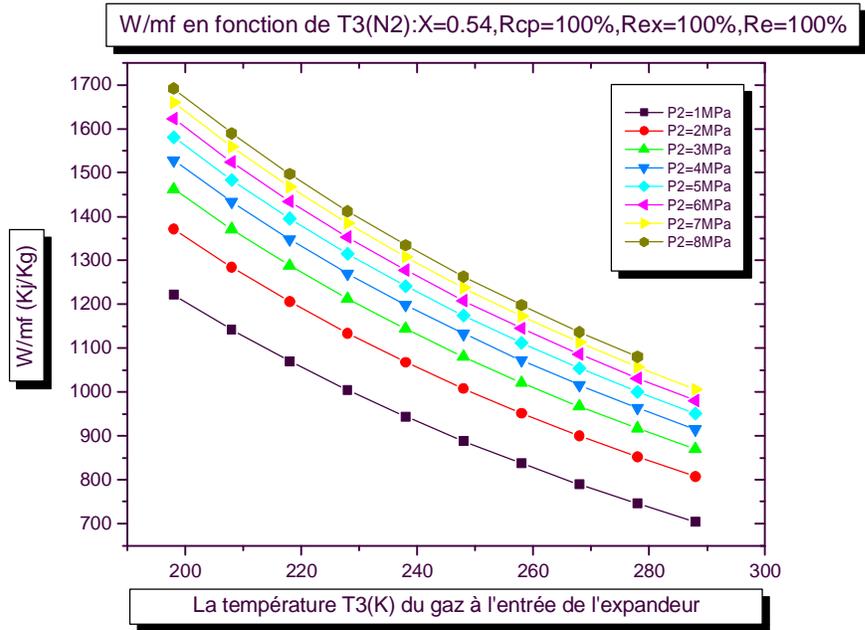
Le même cas, de l'azote, FOM égal à 0.5070 plus faible par rapport au deuxième cas à cause de la diminution du rendement de l'échangeur thermique (figures **6.6, g, h, i**)



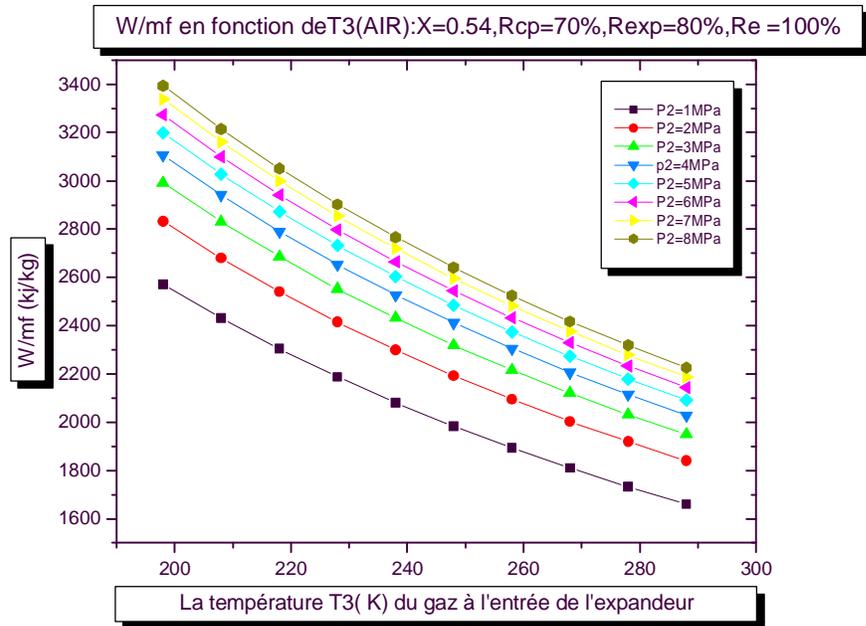
**Figure 6.1.a** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'air



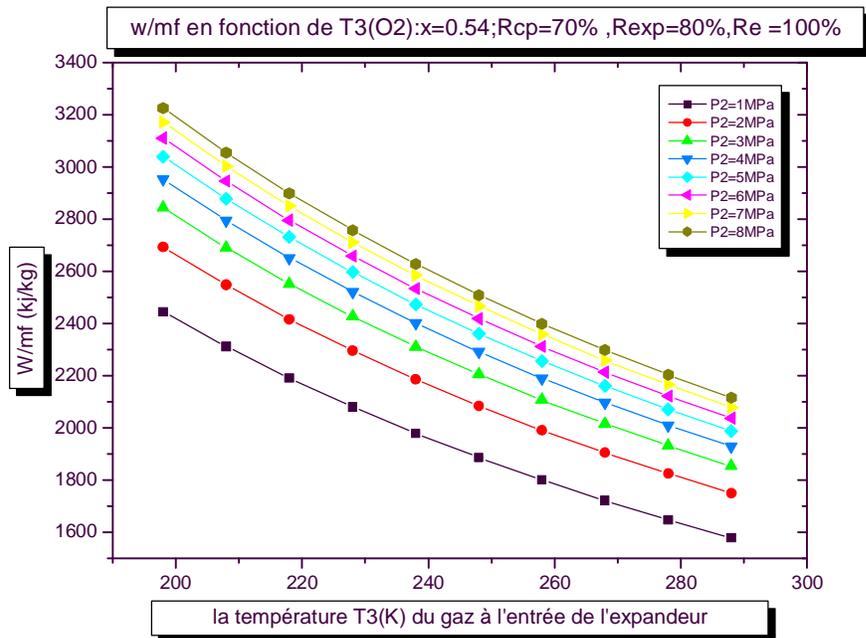
**Figure 6.1.b** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'oxygène.



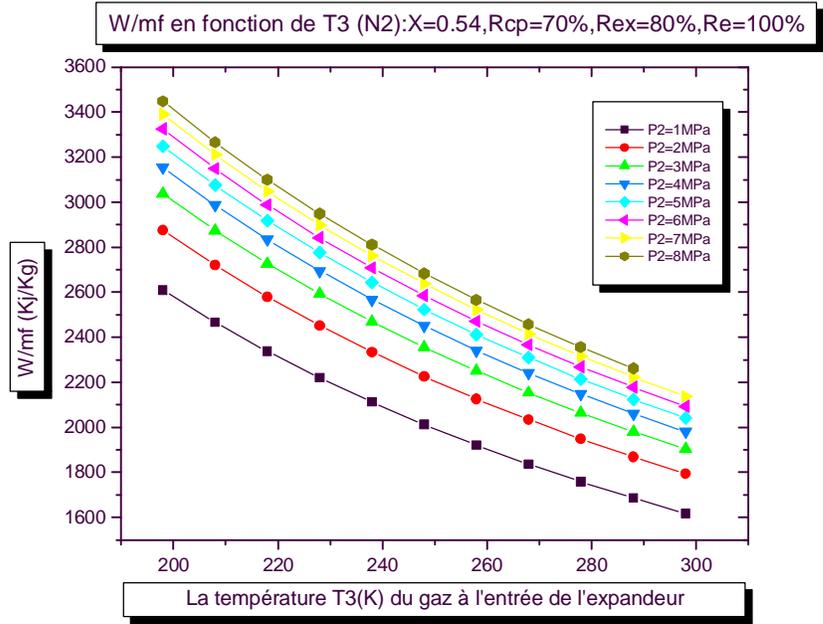
**Figure 6.1.c** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'azote



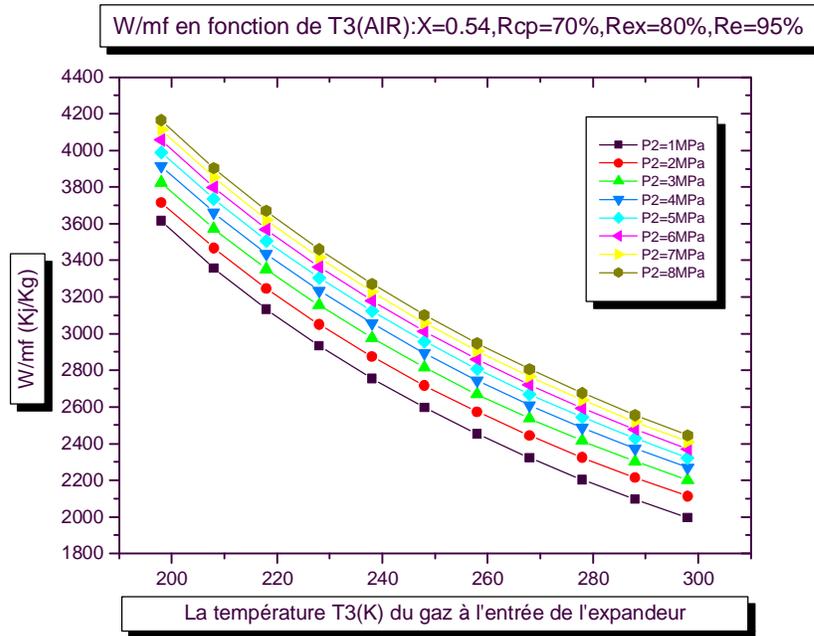
**Figure 6.1.d** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'air



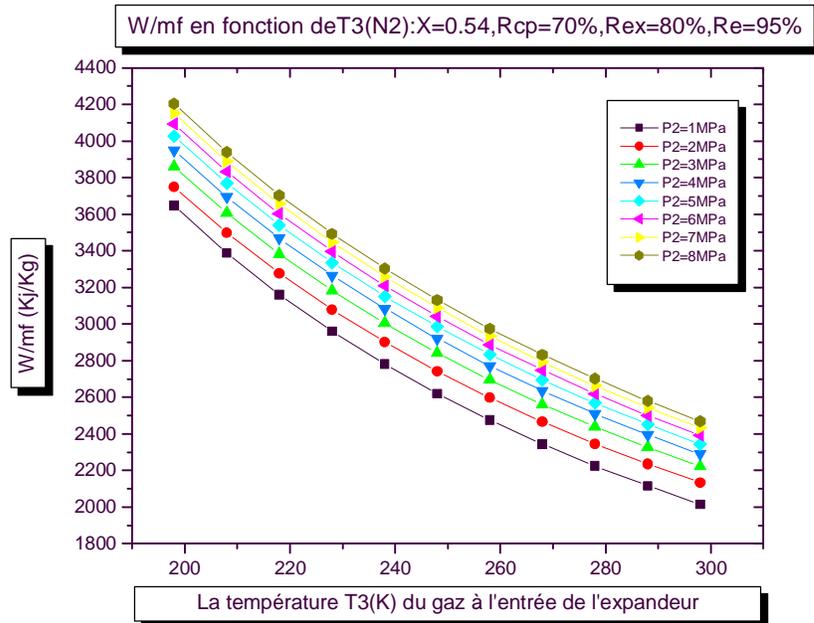
**Figure 6.1.e** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'oxygène.



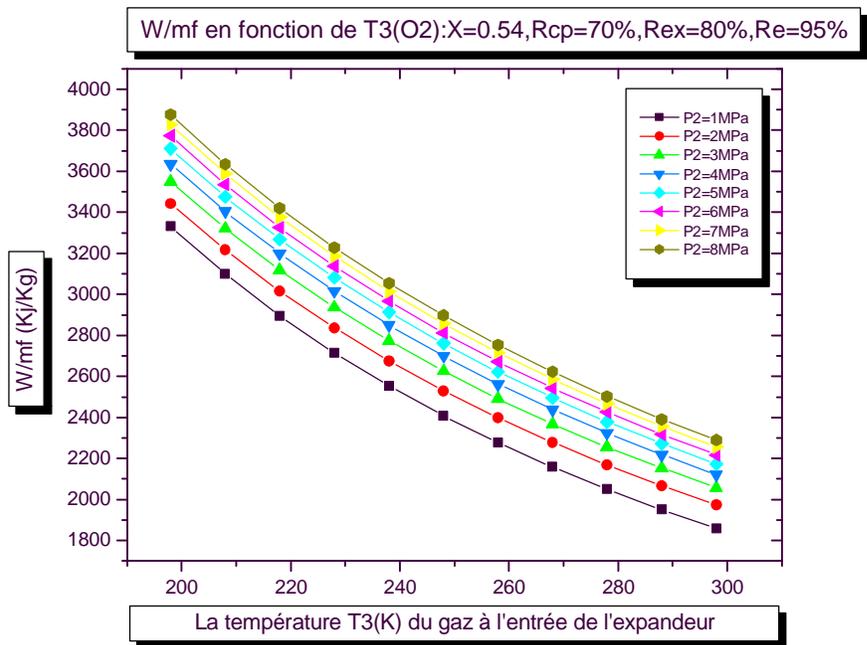
**Figure 6.1.f** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'azote.



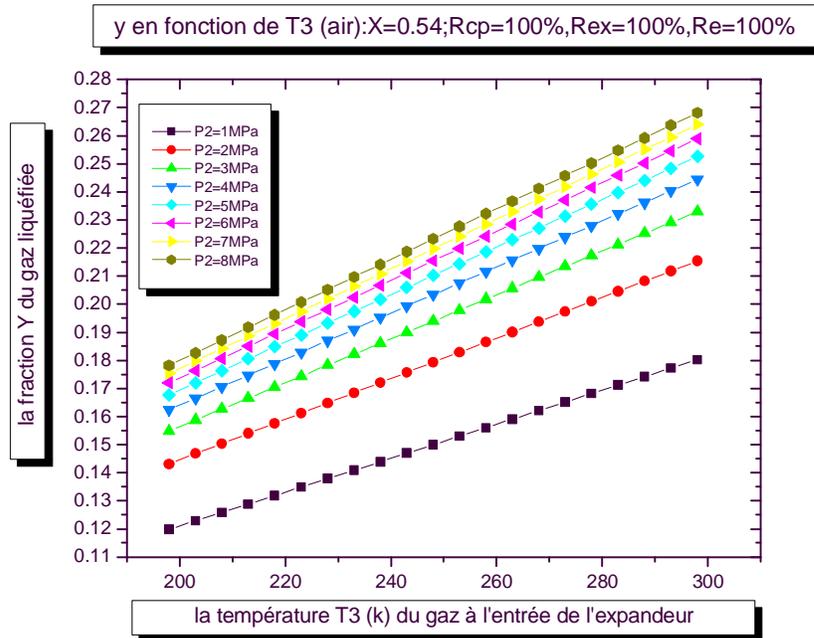
**Figure 6.1.g** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'air.



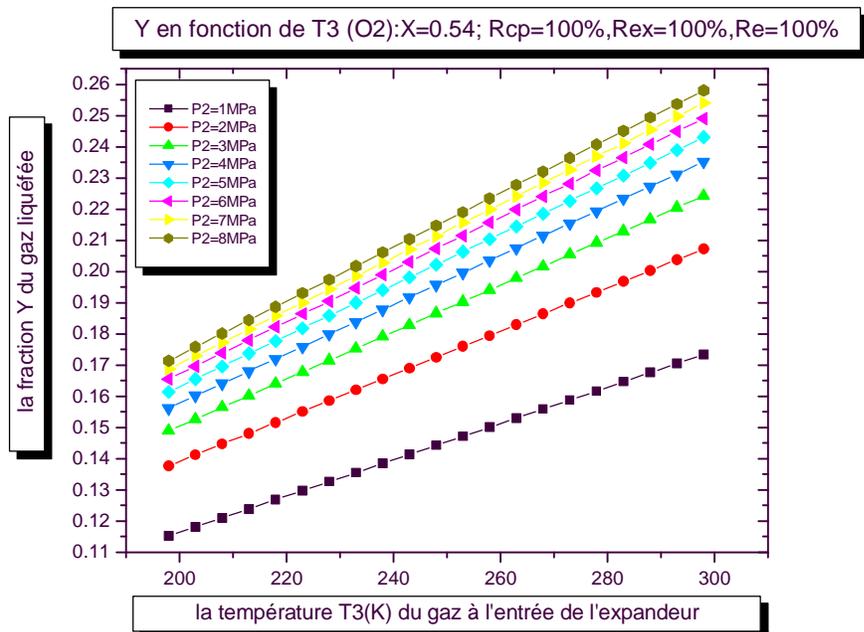
**Figure 6.1.h** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'azote



**Figure 6.1.i** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'oxygène



**Figure 6.2.a** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'air



**Figure 6.2.b** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'oxygène

Y en fonction de T3 (N2) : X=0.54;Rcp=100%,Rex =100%,Re=100%

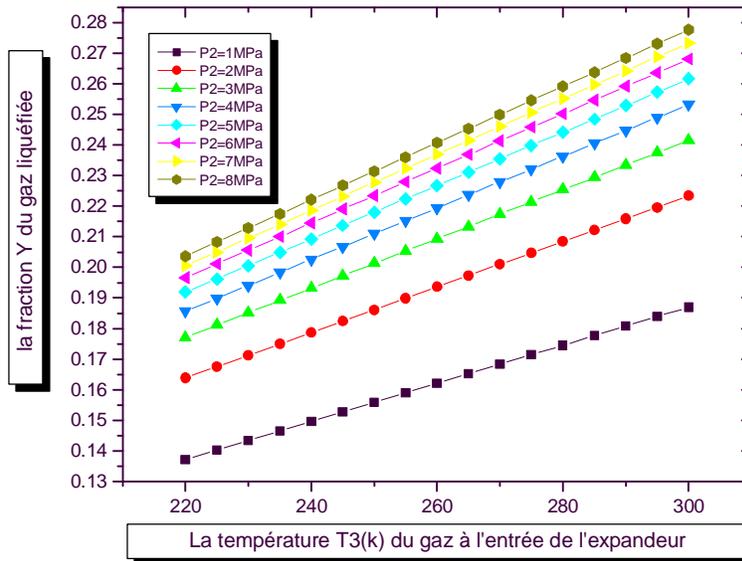
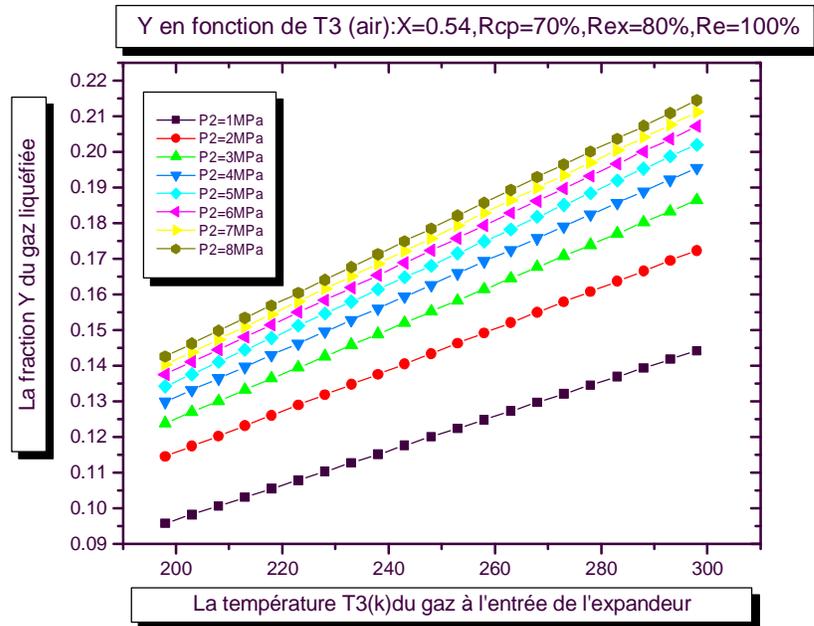
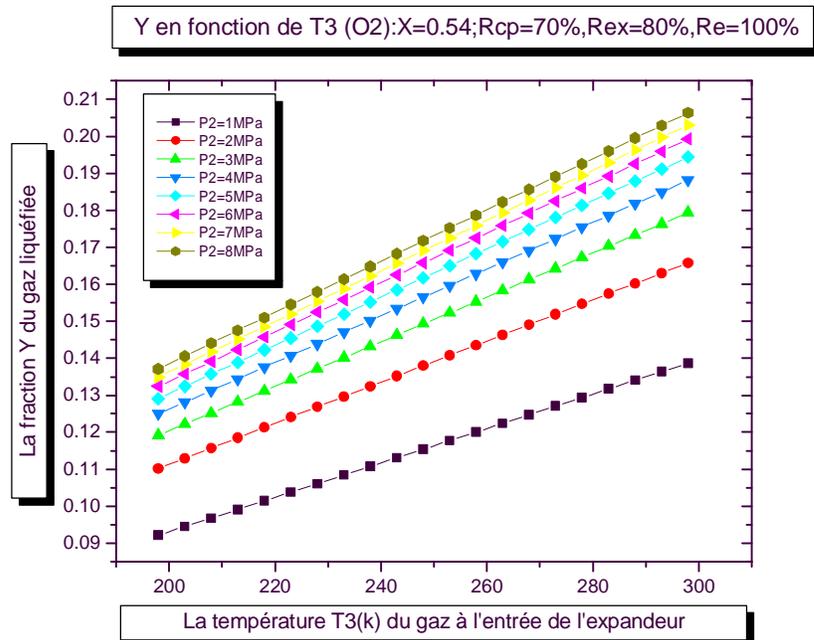


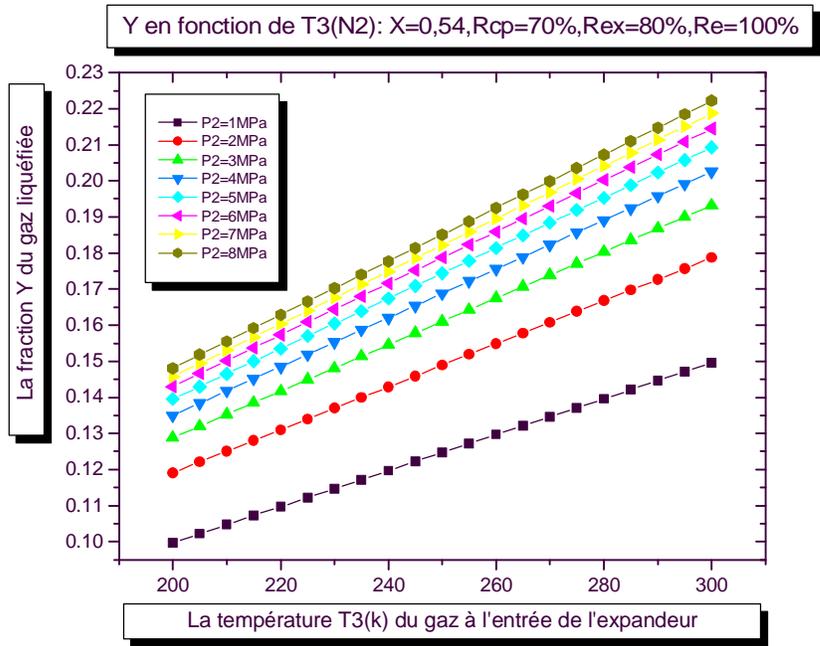
Figure 6.2.c Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'azote.



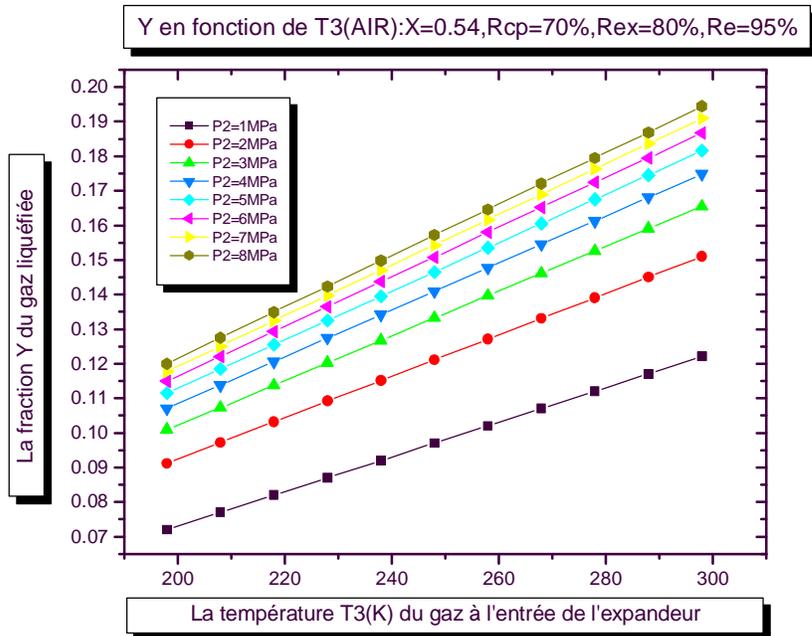
**Figure 6.2.d** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'air



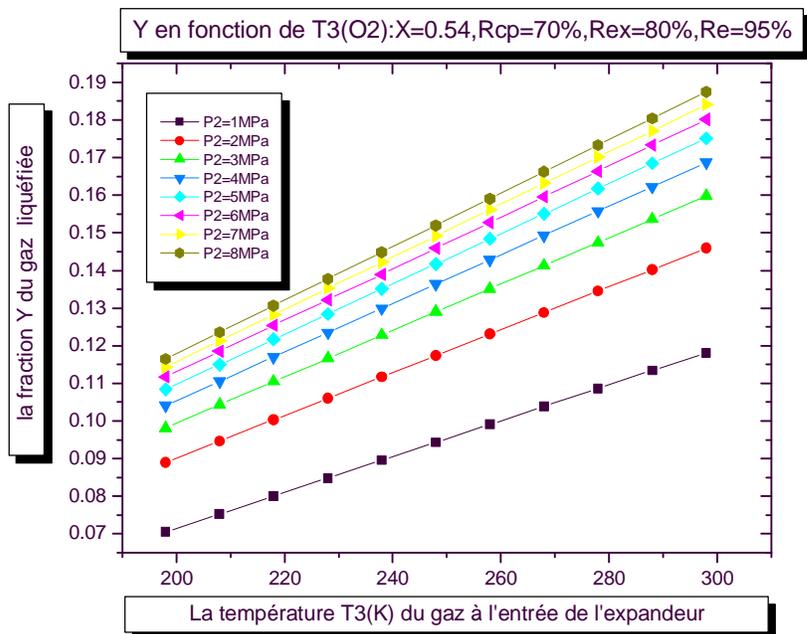
**Figure 6.2.e** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'oxygène



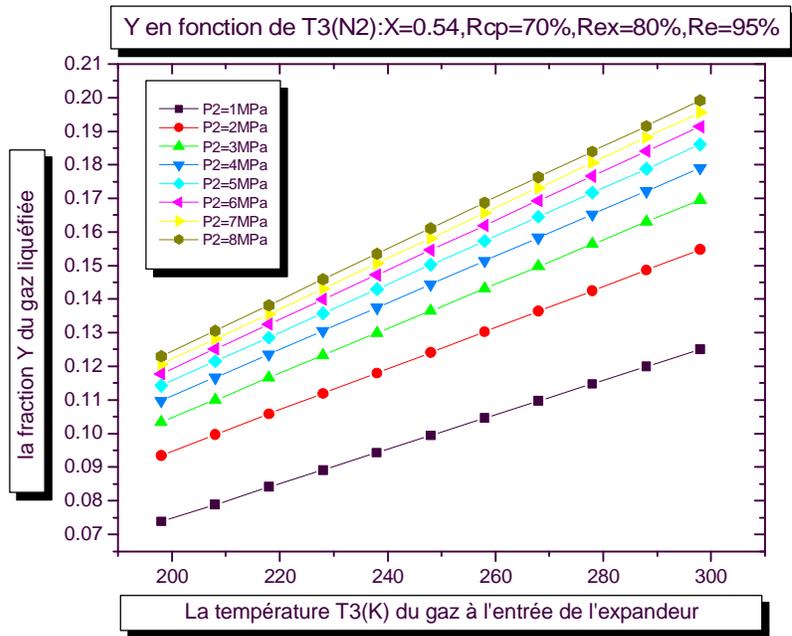
**Figure 6.2.f** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'azote.



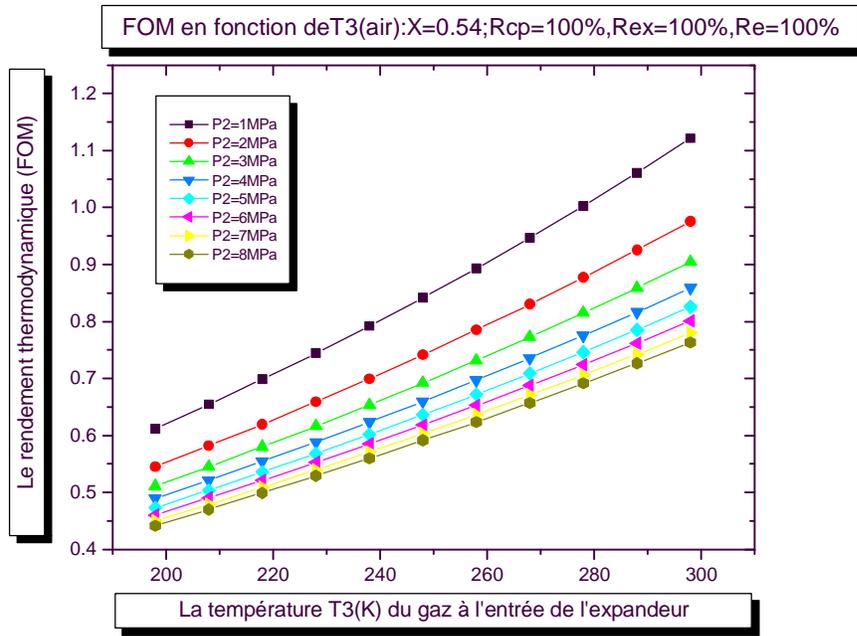
**Figure 6.2.g** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'air



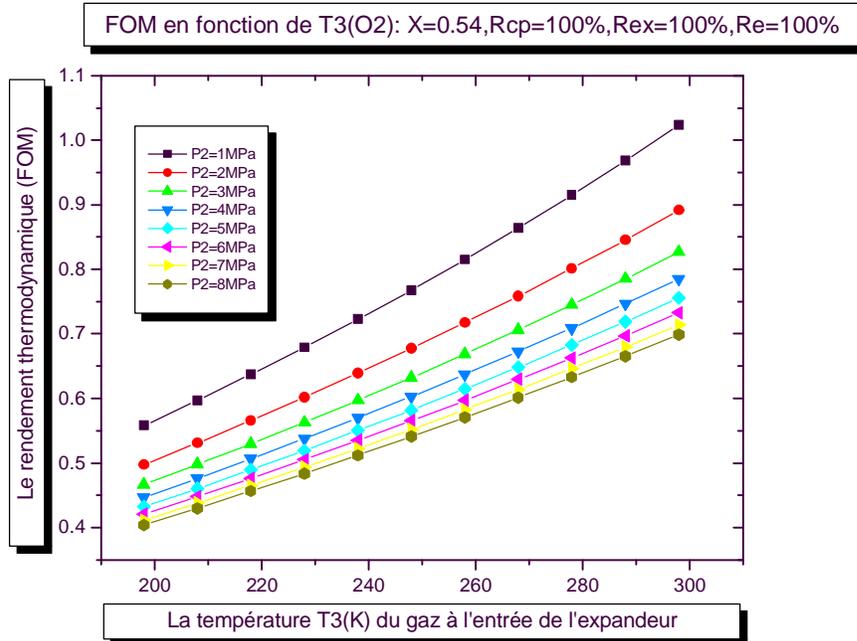
**Figure 6.2.h** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'oxygène



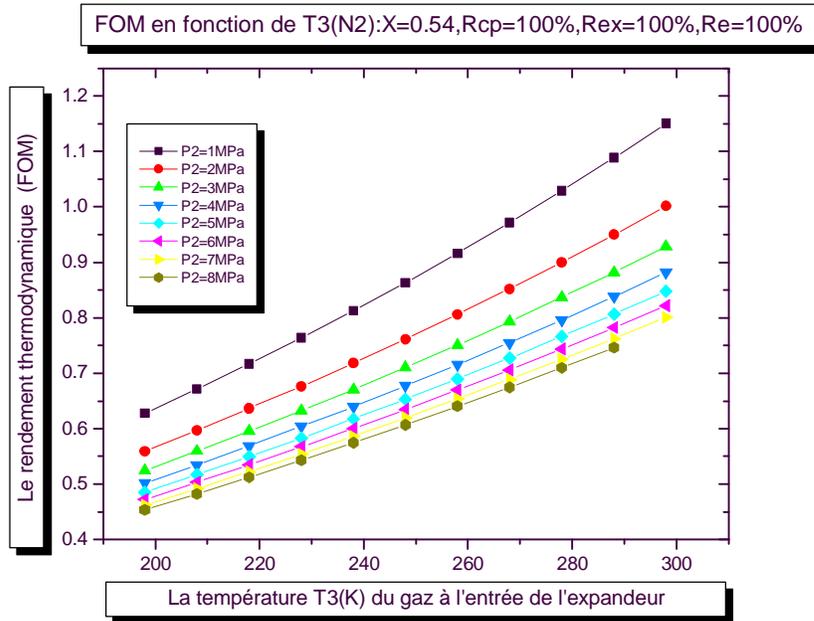
**Figure 6.2.i** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'azote.



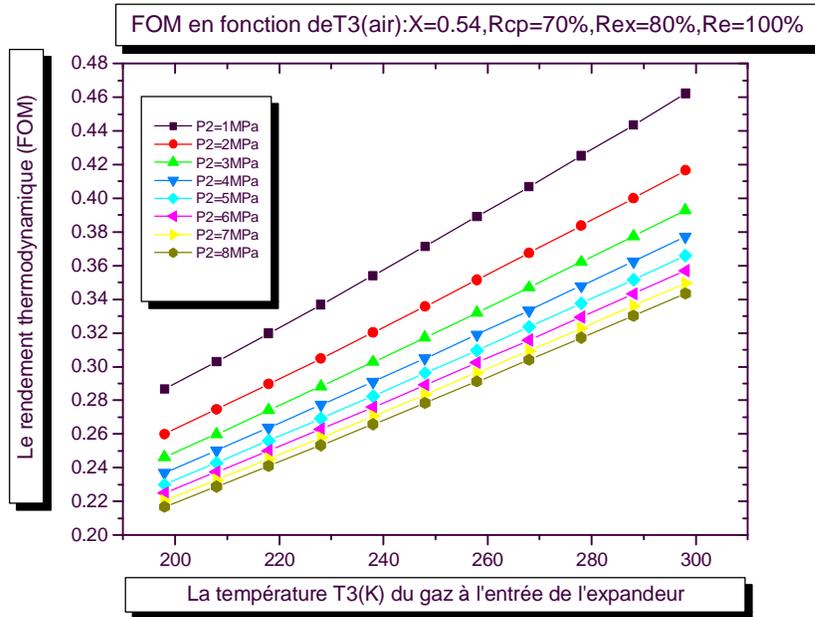
**Figure 6.3.a** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'air



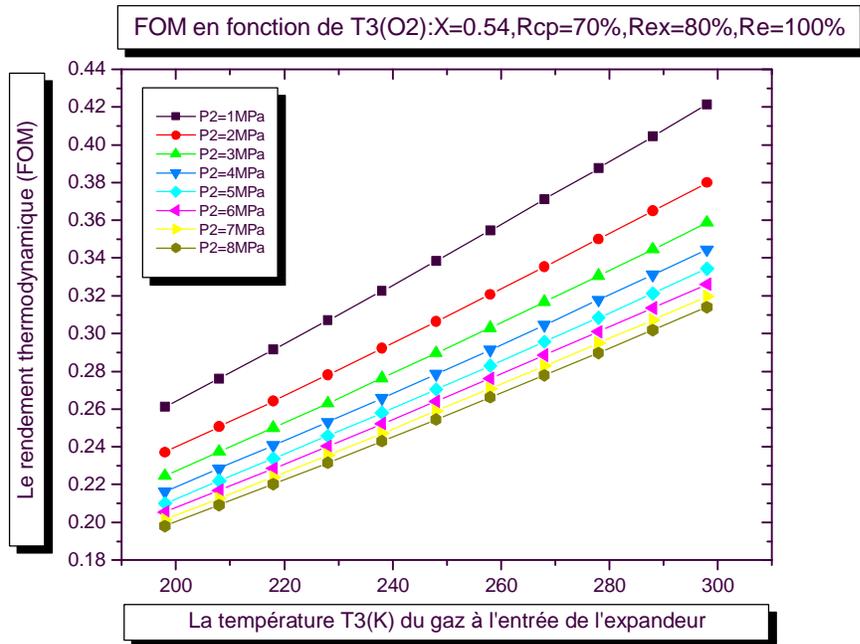
**Figure 6.3.b** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'oxygène



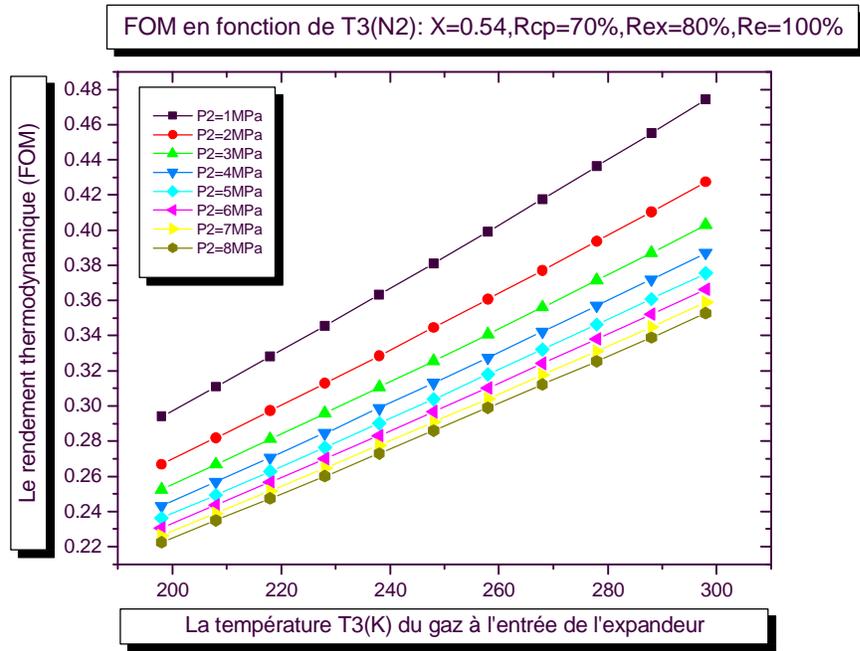
**Figure 6.3.c** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'azote



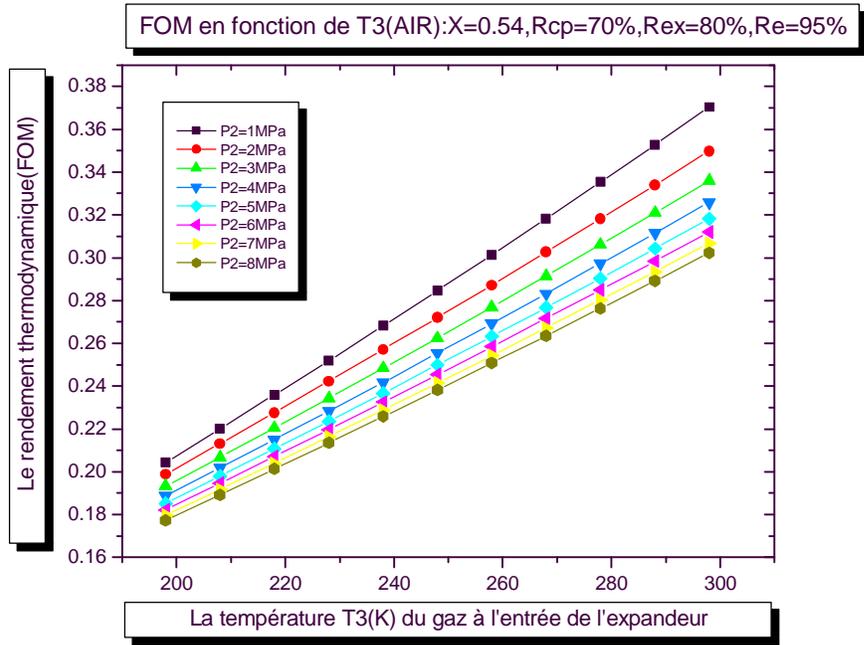
**Figure 6.3.d** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'air



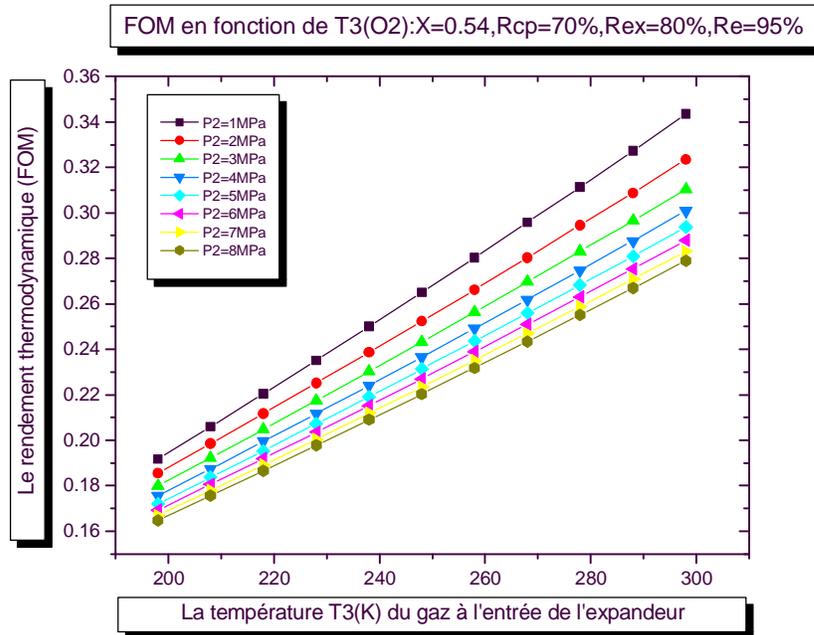
**Figure 6.3.e** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'oxygène



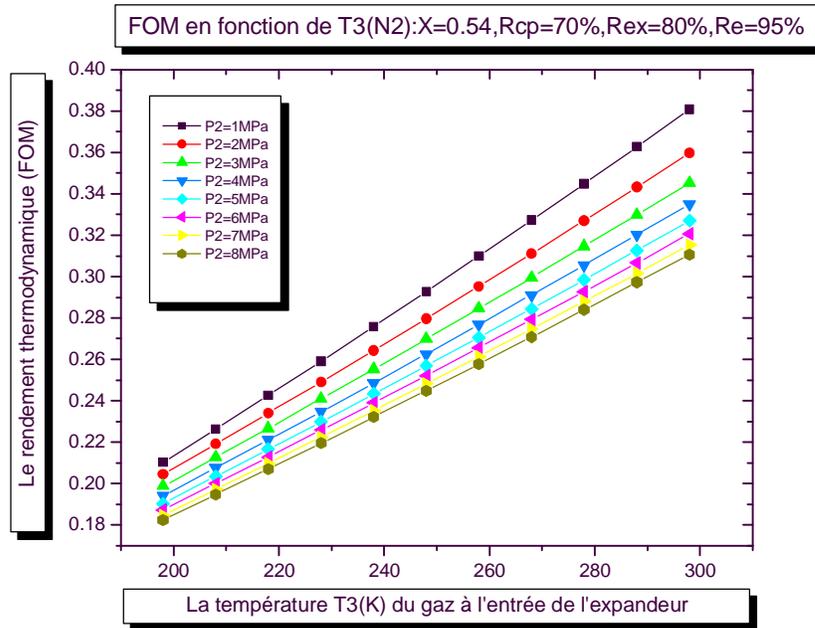
**Figure 6.3.f** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'azote



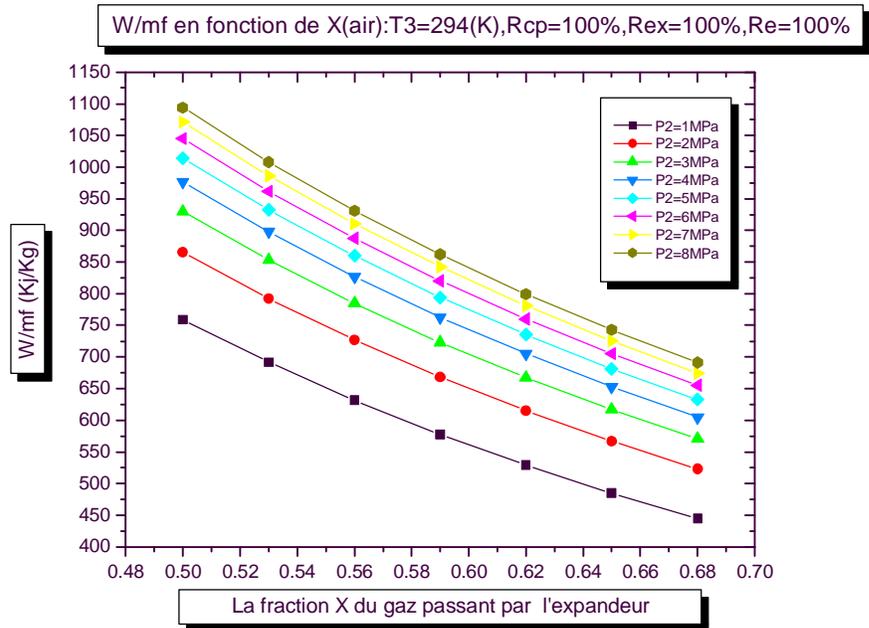
**Figure 6.3.g** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'air



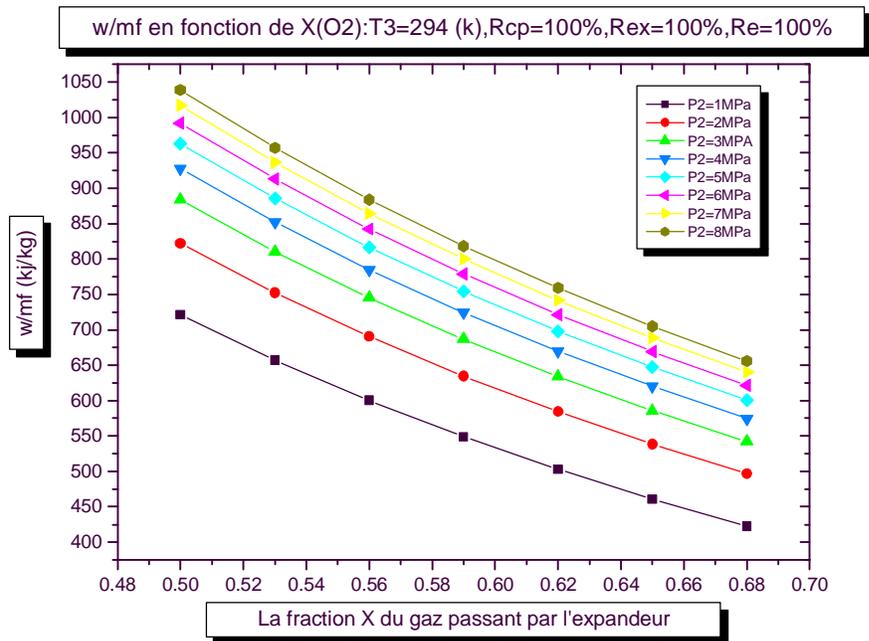
**Figure 6.3.h** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'oxygène



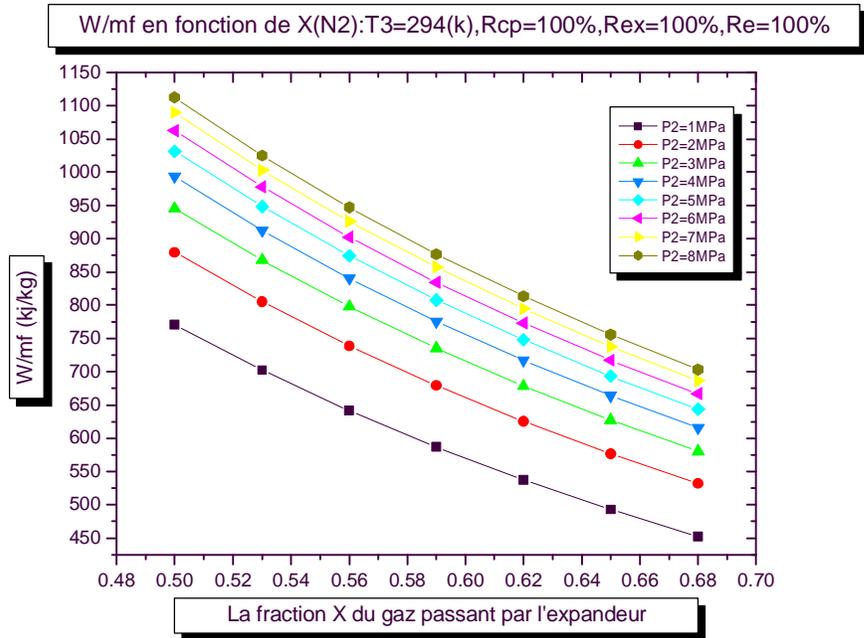
**Figure 6.3.i** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la température T3 du gaz à l'entrée de l'expandeur pour l'azote



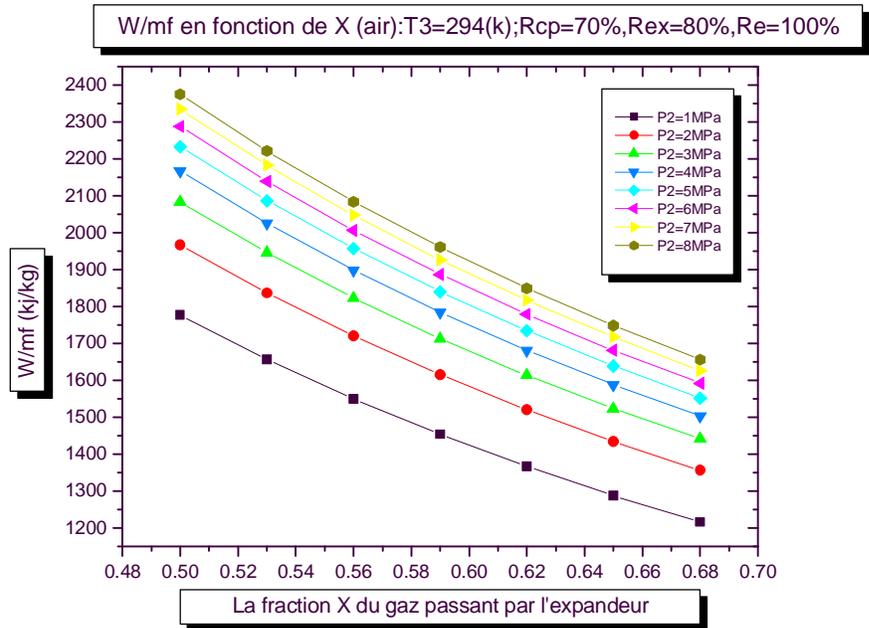
**Figure 6.4.a** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'air



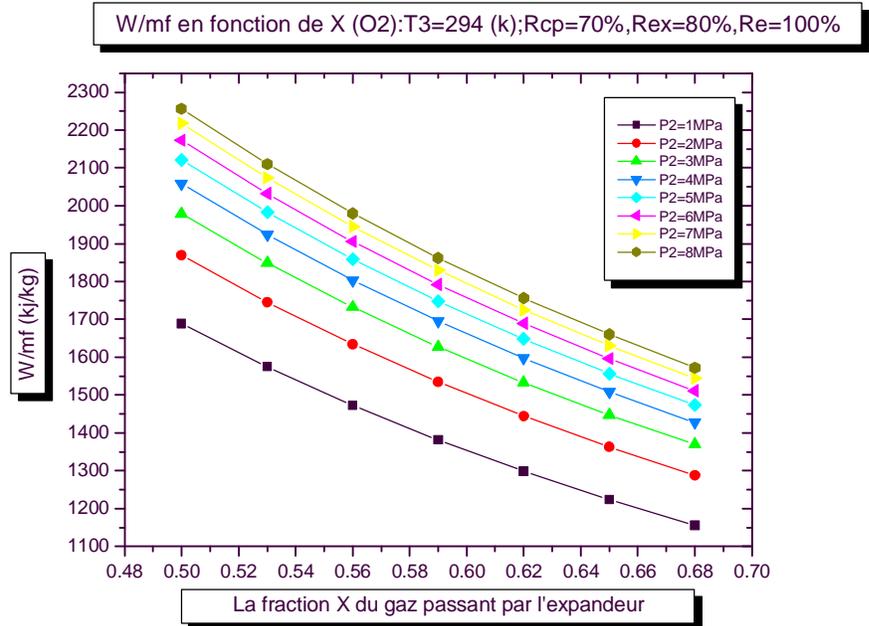
**Figure 6.4.b** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'oxygène



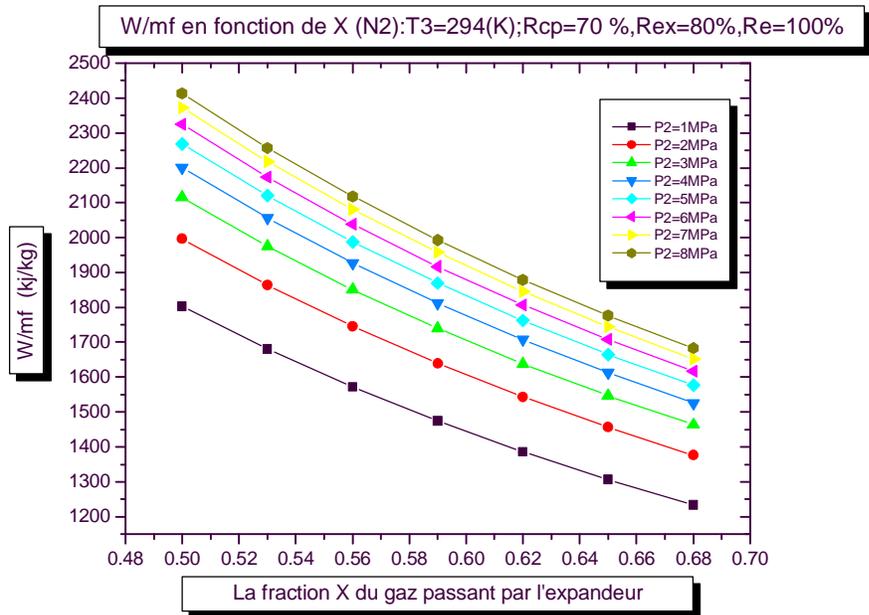
**Figure 6.4.c** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'azote



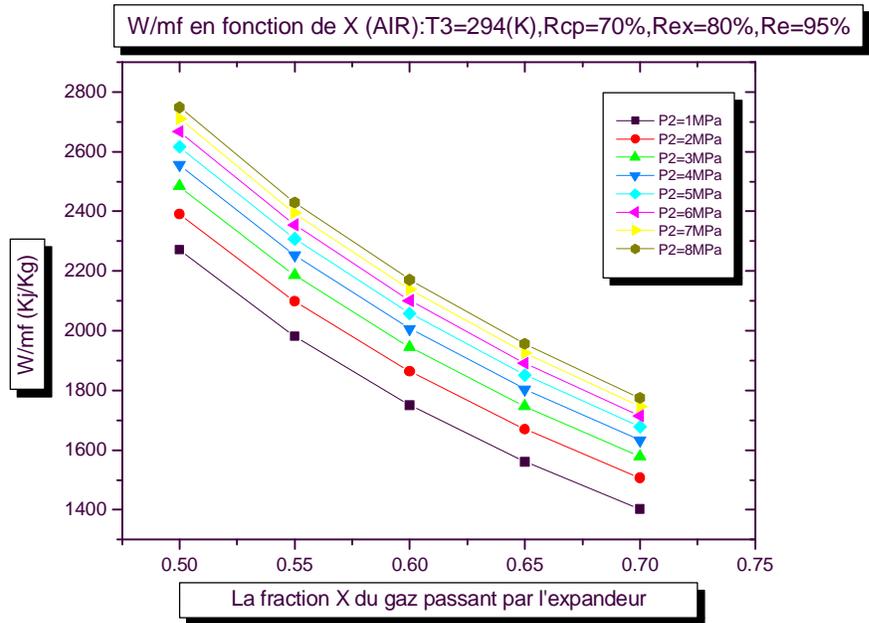
**Figure 6.4.d** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'air



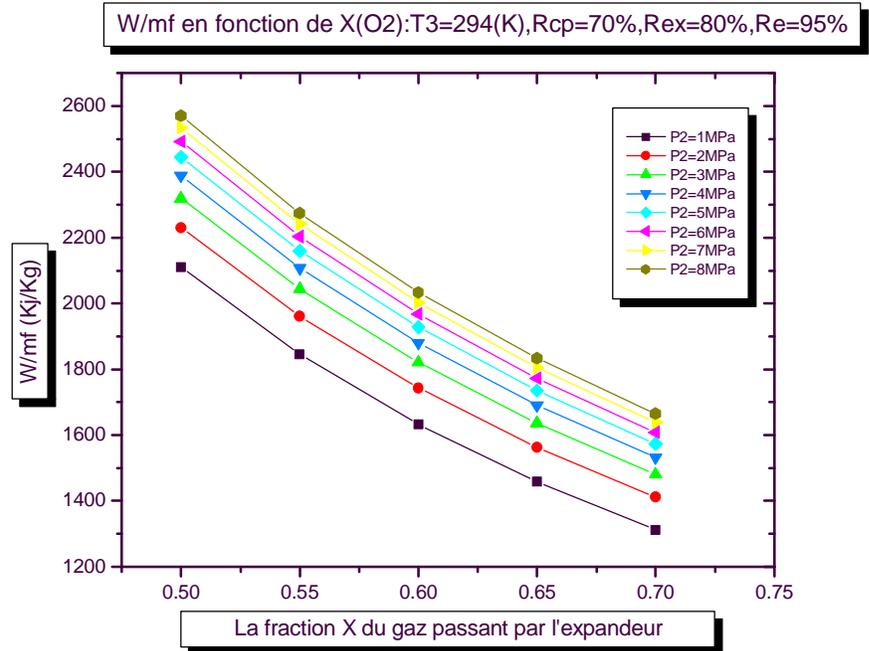
**Figure 6.4.e** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'oxygène



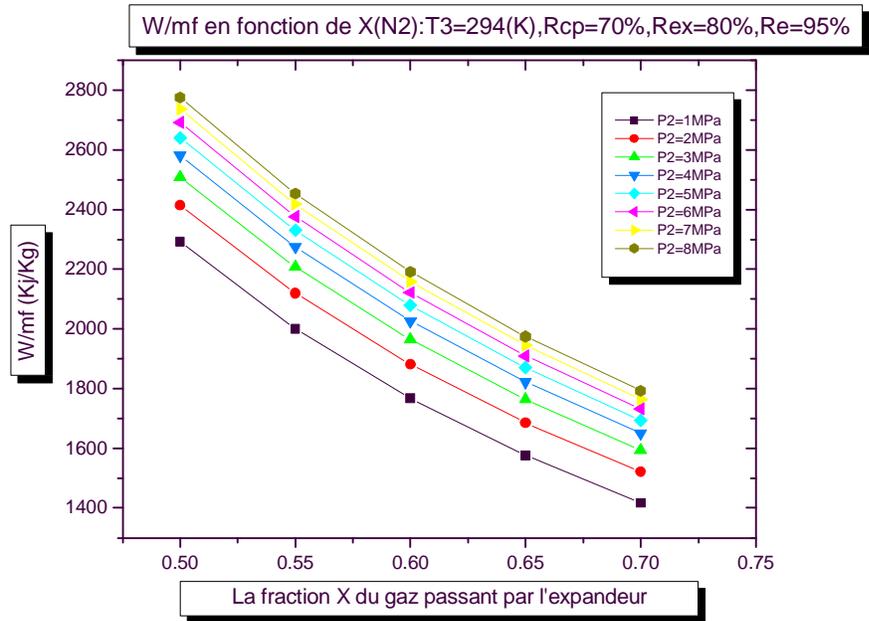
**Figure 6.4.f** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'azote



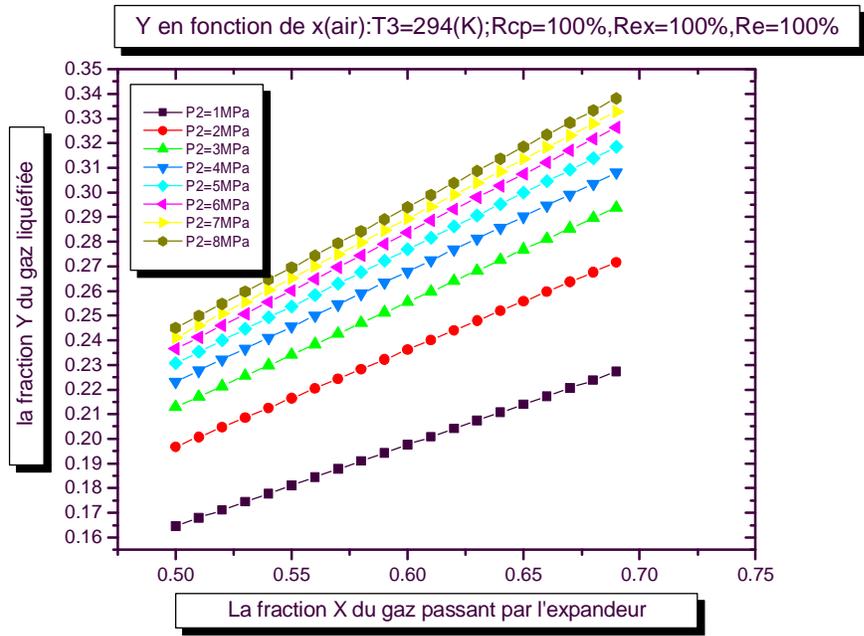
**Figure 6.4.g** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée ( $W/mf$ ) en fonction de la fraction  $X$  du gaz passant par l'expandeur pour l'air



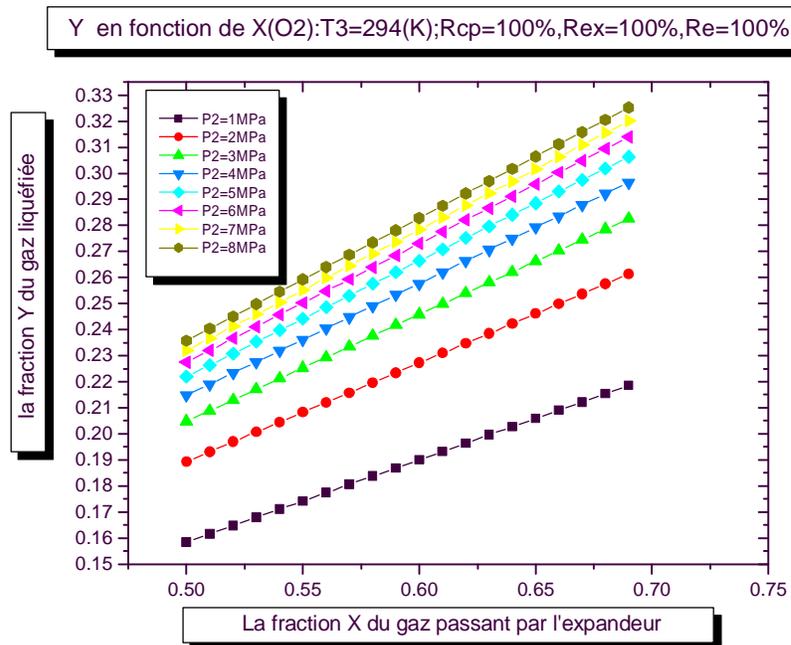
**Figure 6.4.h** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée ( $W/mf$ ) en fonction de la fraction  $X$  du gaz passant par l'expandeur pour l'oxygène



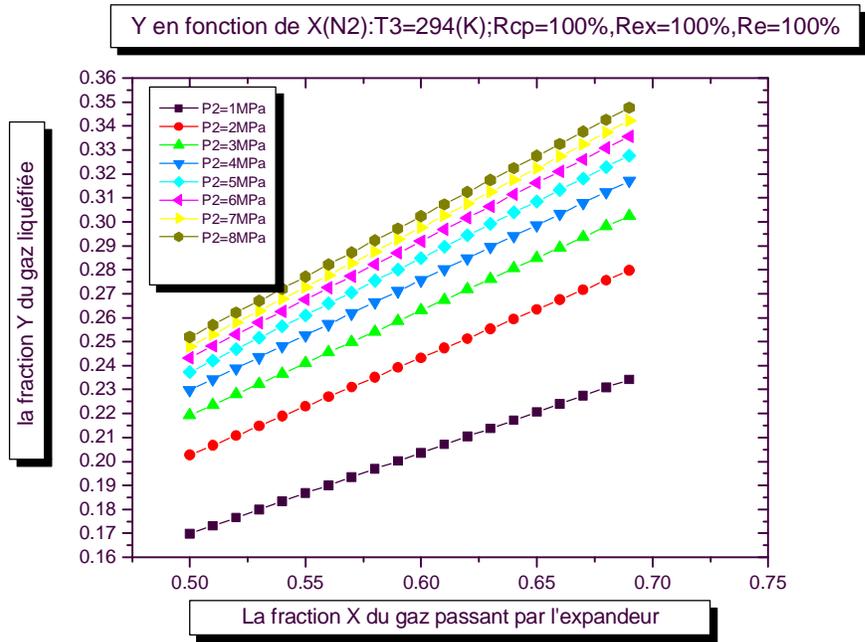
**Figure 6.4.i** Profils de variation du travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée (W/mf) en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'azote



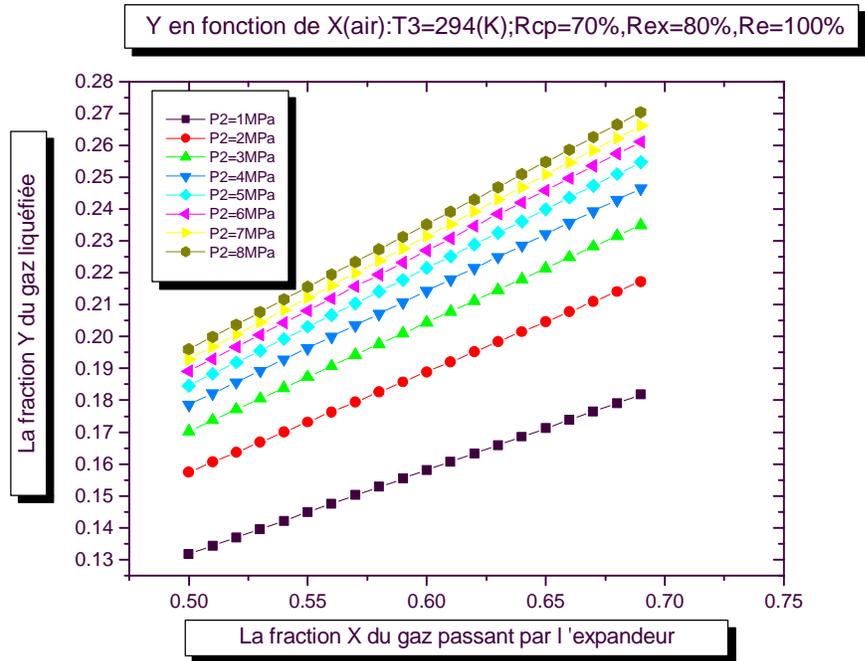
**Figure 6.5. a** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'air.



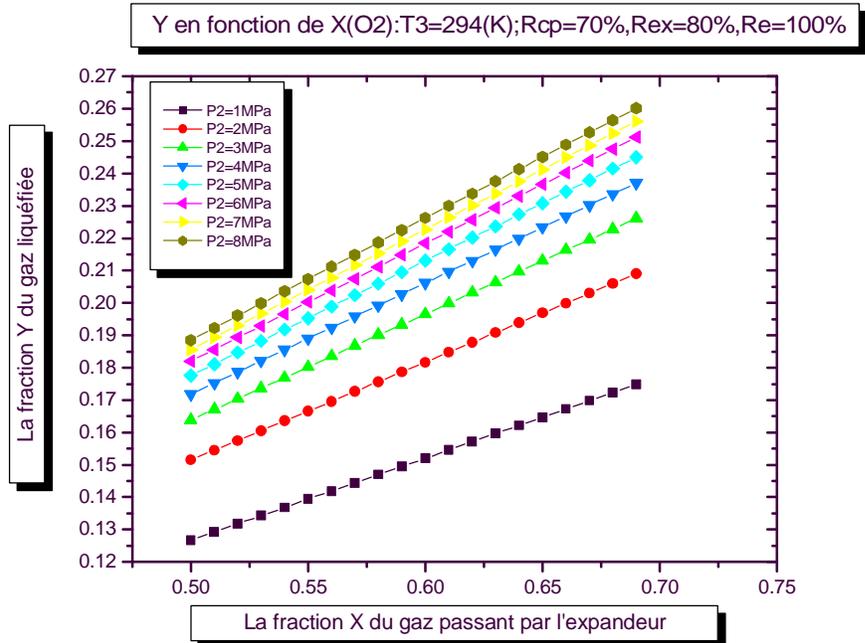
**Figure 6.5. b** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'oxygène



**Figure 6.5. c** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'azote

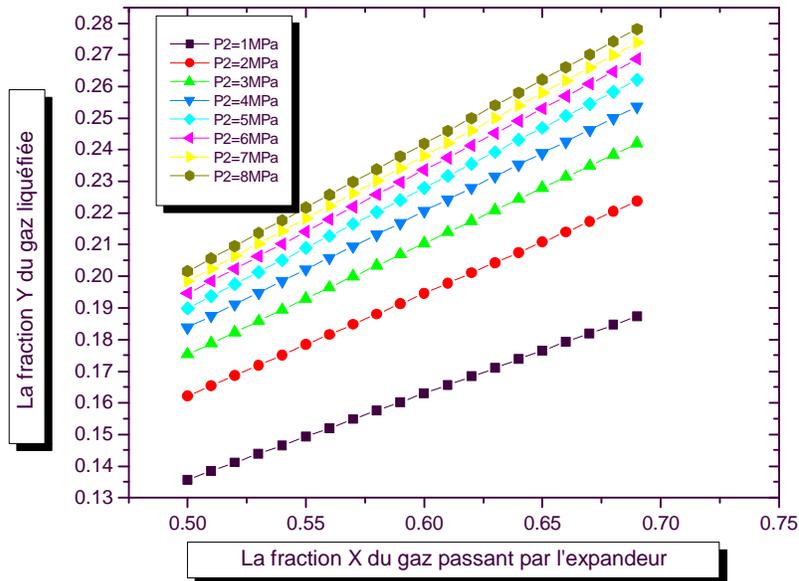


**Figure 6.5.d** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'air.

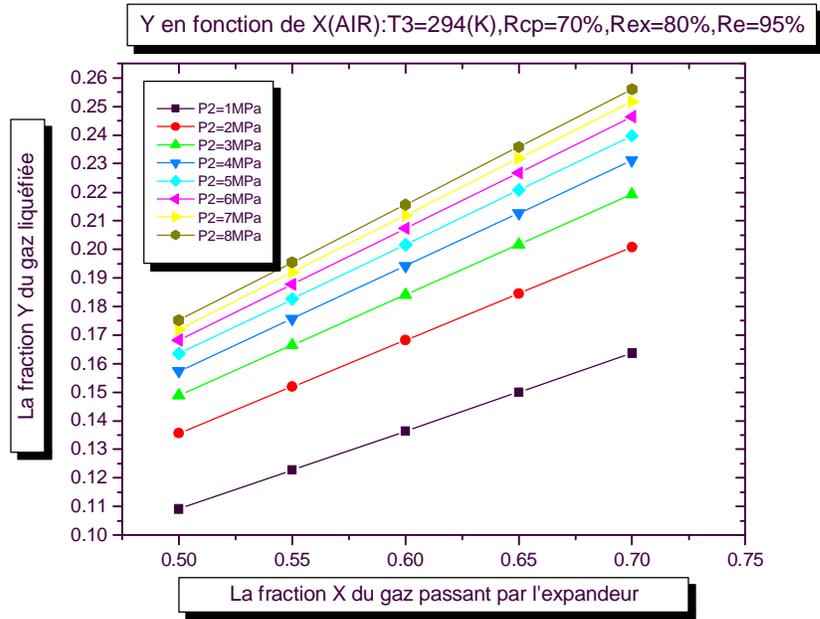


**Figure 6.5.e** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'oxygène

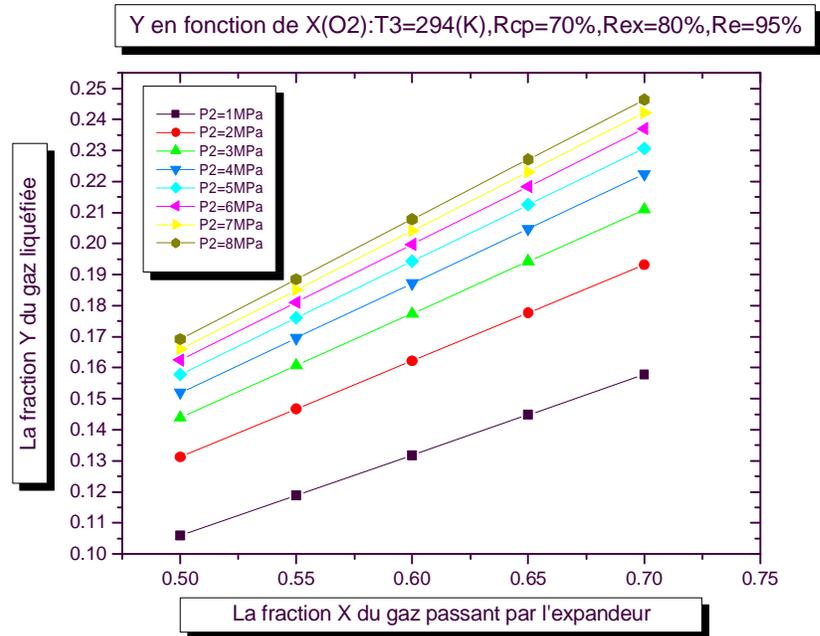
Y en fonction de X(N<sub>2</sub>):T<sub>3</sub>=294(K);R<sub>cp</sub>=70%,R<sub>ex</sub>=80%,R<sub>e</sub>=100%



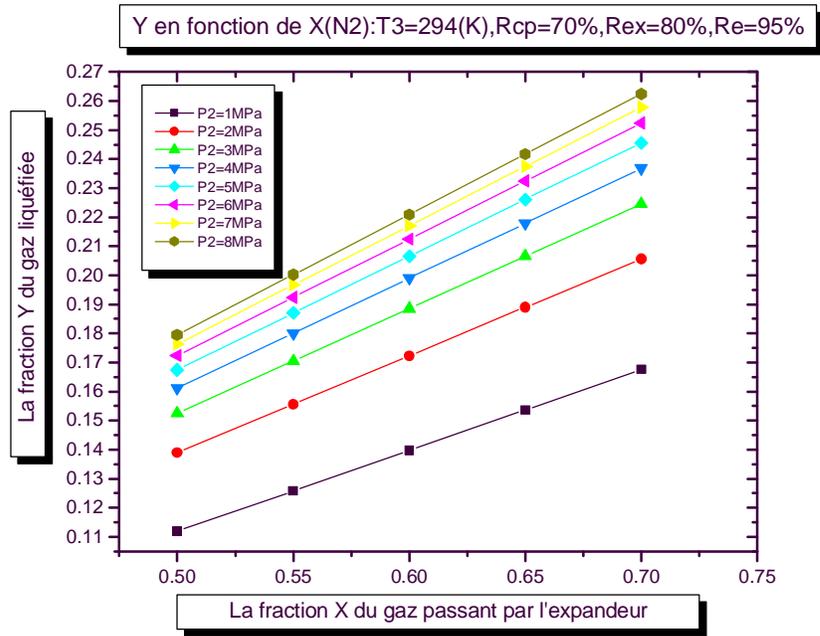
**Figure 6.5.f** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'azote



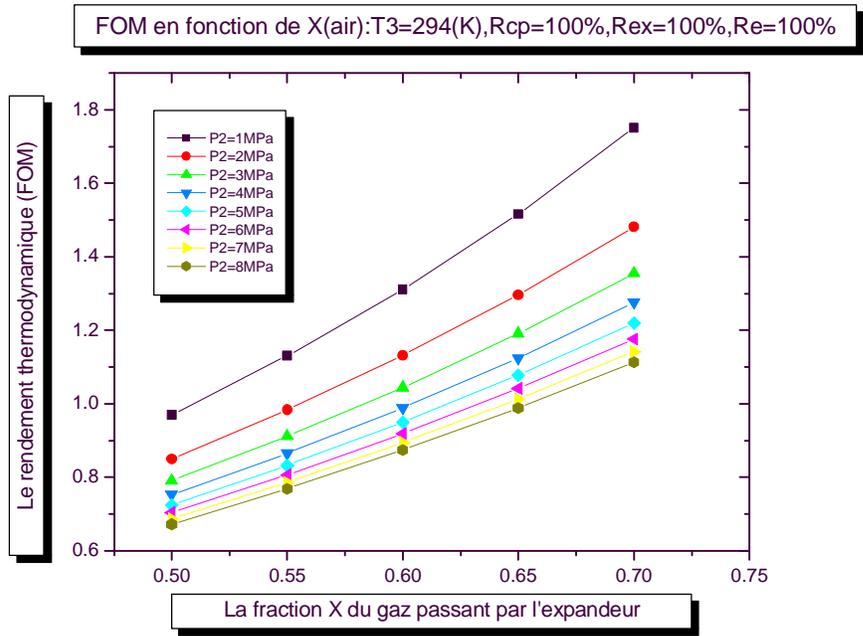
**Figure 6.5.g** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'air.



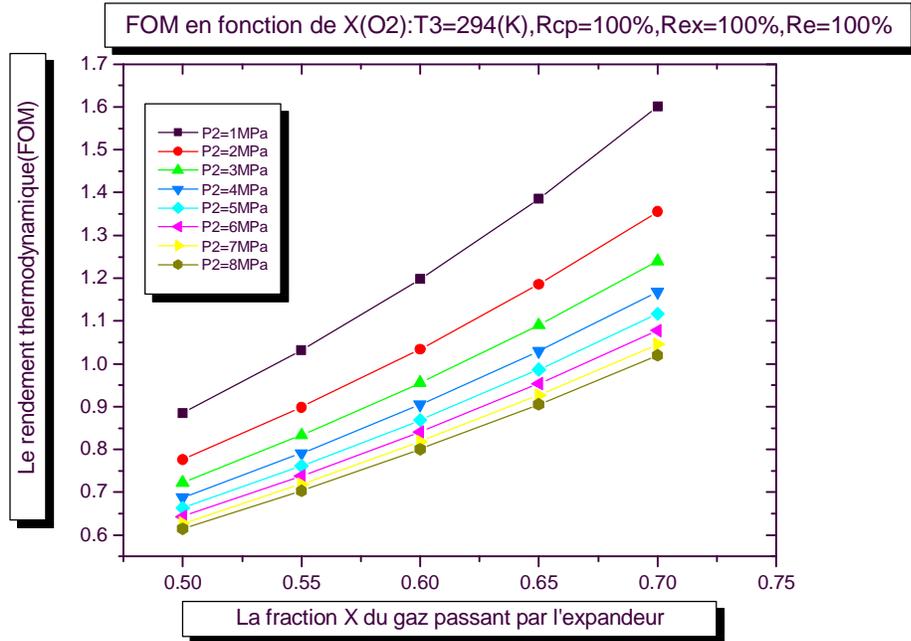
**Figure 6.5.h** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'oxygène



**Figure 6.5. i** Profils de variation de la fraction Y du gaz liquéfiée en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'azote



**Figure 6.6.a** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'air.



**Figure 6.6.b** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'oxygène.

FOM en fonction de X(N2): T3=294 (k), Rcp=100%; Rex=100%, Re=100%

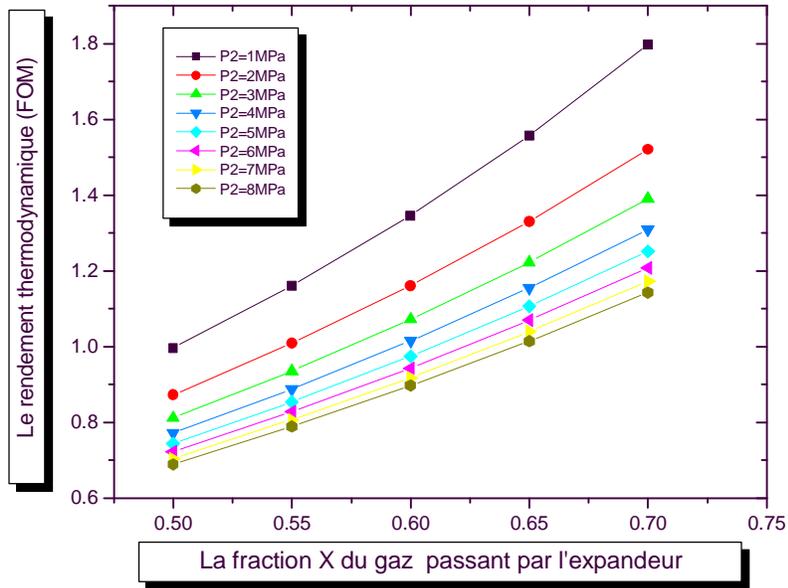
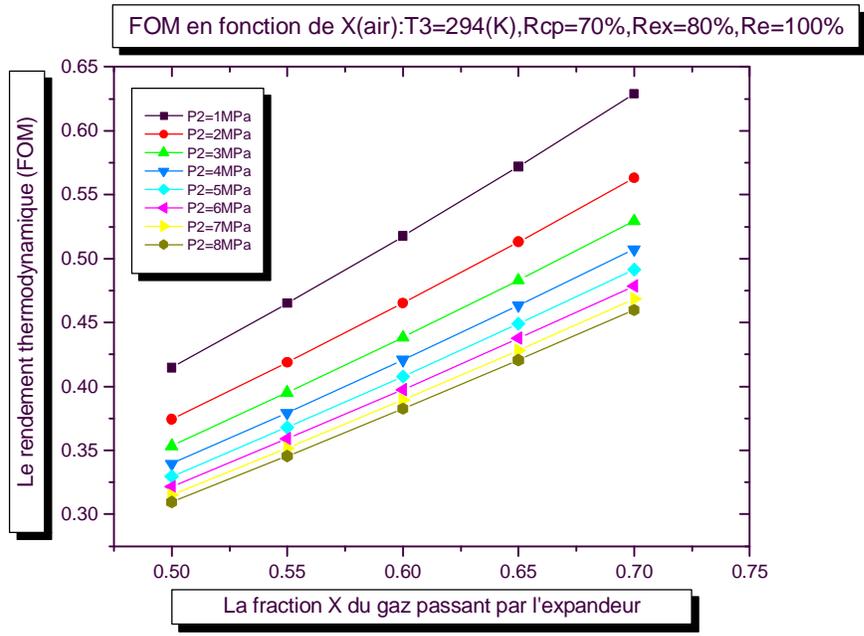
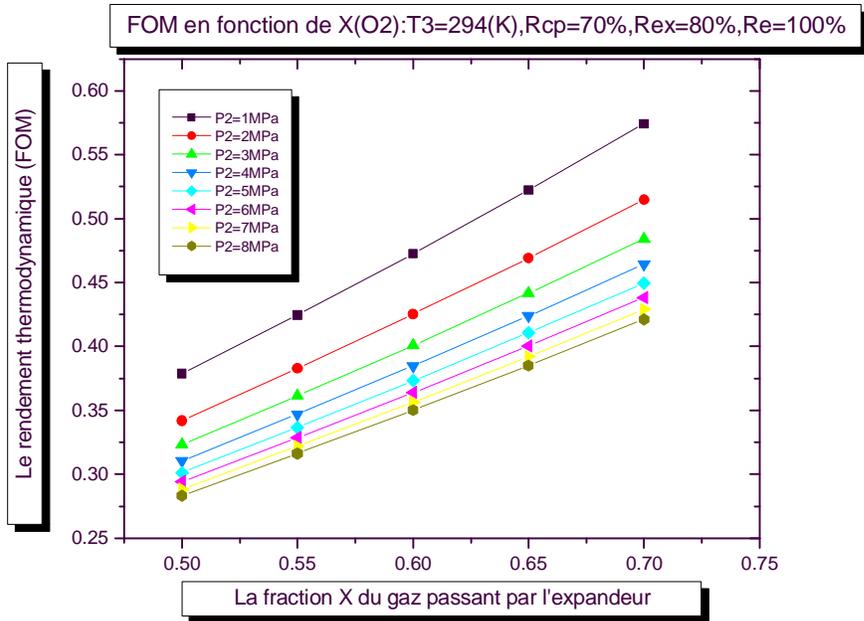


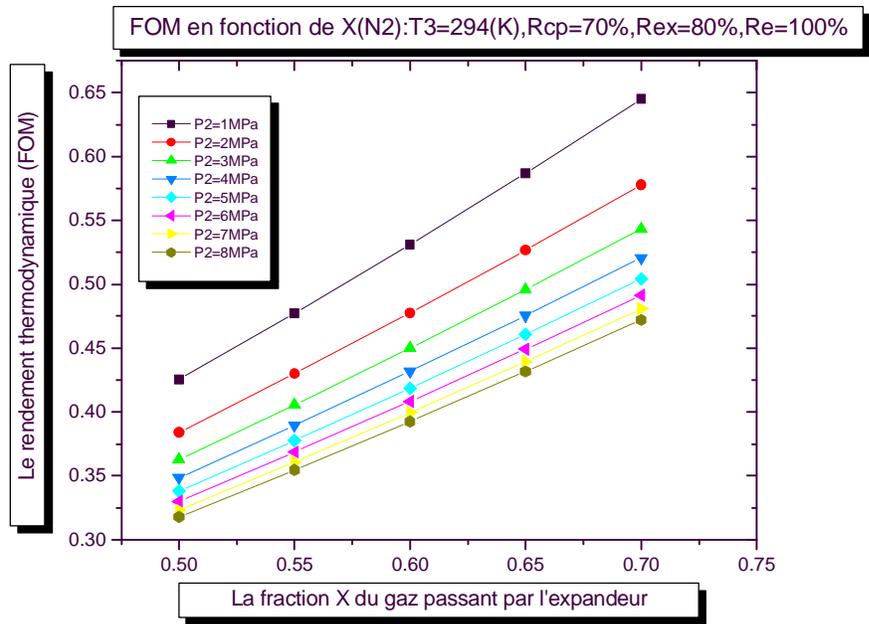
Figure 6.6.c Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'azote.



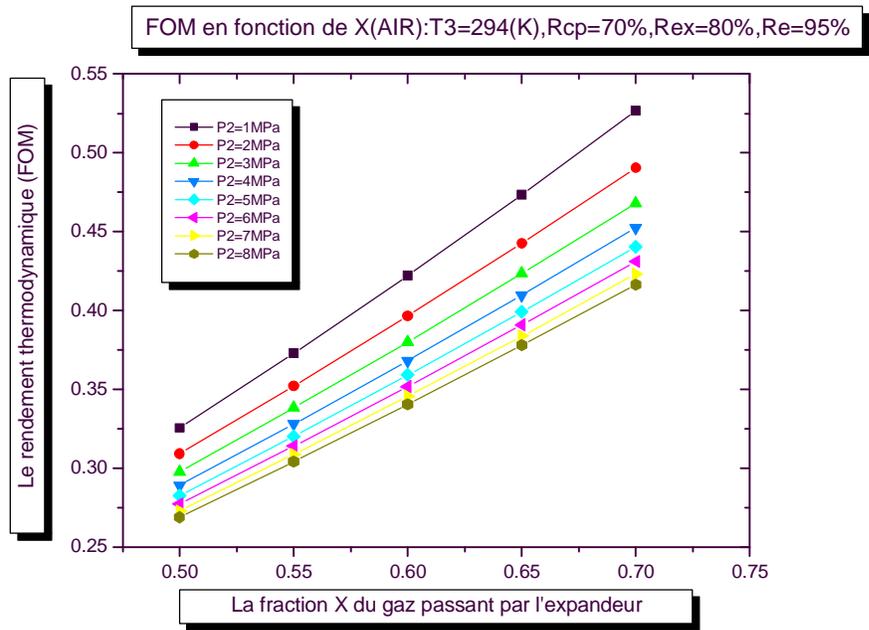
**Figure 6.6.d** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'air.



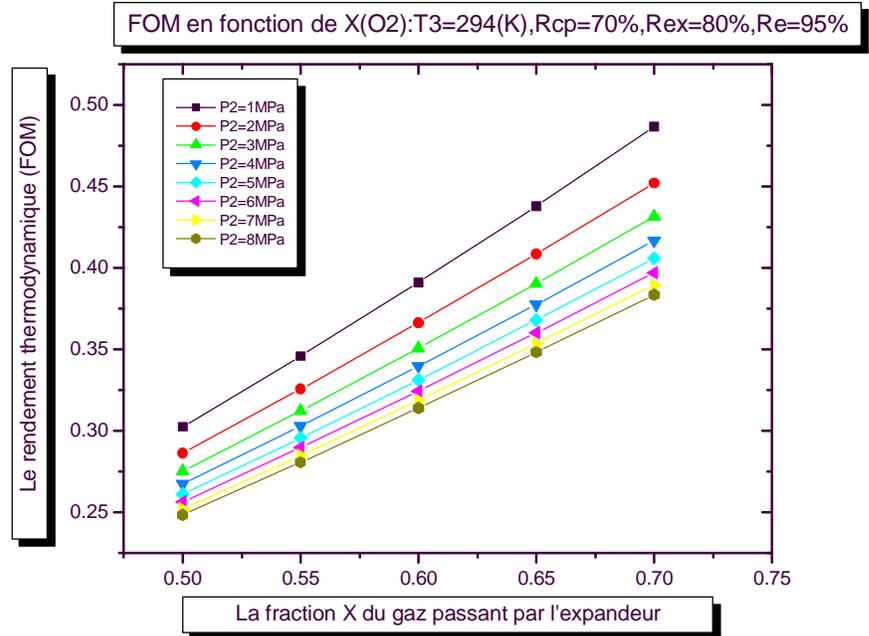
**Figure 6.6.e** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'oxygène.



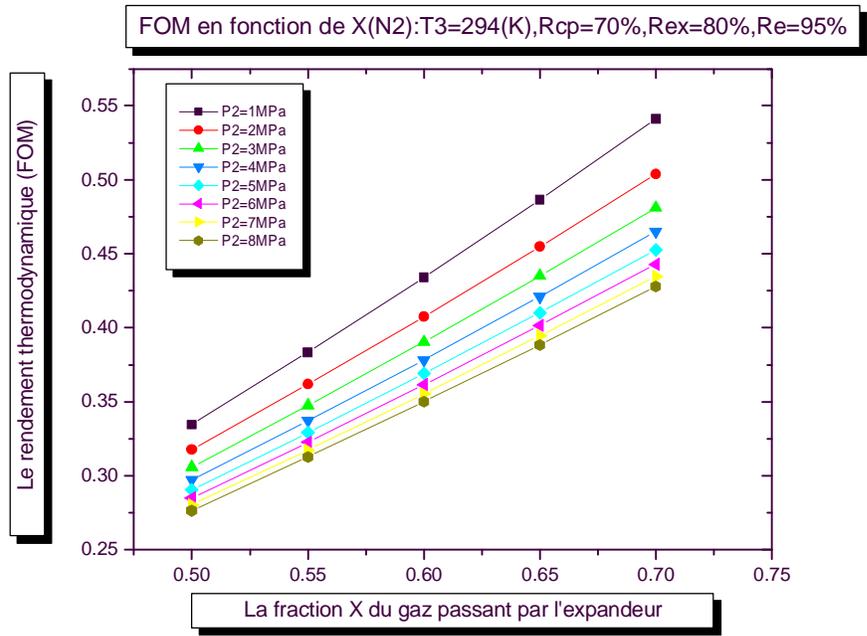
**Figure 6.6.f** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'azote.



**Figure 6.6.g** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'air.



**Figure 6.6.h** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'oxygène.



**Figure 6.6.i** Profils de variation du rendement thermodynamique FOM en fonction de la fraction X du gaz passant par l'expandeur pour l'azote.

## 6.2 Discussion des résultats :

On constate selon les résultats obtenus et les profils de variation du travail  $w/m_f$  nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée qui augmente avec l'augmentation de la pression  $P_2$  à la sortie du compresseur et la diminution de la fraction  $X$  du gaz passant par l'expandeur et sa température  $T_3$ . Ce comportement est tout à fait normal, car le système absorbe plus d'énergie si on veut avoir une pression élevée à la fin de la compression et comme le travail produit par la détente isentropique qui est égal à  $X(h_3 - h_e)$  est utilisé pour aider à la compression, c'est clair, si la fraction  $X$  n'est pas importante et que sa température  $T_3$  est basse qui provoque une diminution de son enthalpie par conséquent un abaissement du travail fourni par l'expandeur voire une augmentation du travail utile de tout le système.

Ce qui caractérise le cycle de liquéfaction proposé par Claude par rapport aux autres systèmes c'est l'utilisation de la turbine (expandeur) qui participe grandement à l'amélioration de la performance du cycle, notamment sur la quantité liquéfiée qui est proportionnelle à la fraction du gaz passant par l'expandeur et la température de ce gaz comme s'illustre clairement au niveau des courbes.

Quand au rendement thermodynamique FOM qui est proportionnellement inverse au travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée, si ce dernier est important, le système s'éloigne du cycle idéal et par conséquent son rendement est faible.

En tenant compte des effets du rendement global du compresseur  $R_{cp}$ , le rendement adiabatique  $R_{ad_{ex}}$  de l'expandeur, le rendement mécanique  $R_{cp_{ex}}$  de l'expandeur ainsi que le rendement de l'échangeur thermique  $R_e$ , on constate qu'une fois ces appareils ont un rendement égale à 100%, le travail  $w/m_f$  est minimal, la fraction liquéfiée  $y$  ainsi que le rendement thermodynamique FOM sont maximal (cas théorique).

On remarque dans le 2<sup>eme</sup> cas l'effet de diminution des rendements du compresseur et l'expandeur sur l'augmentation de travail  $w/m_f$  et la diminution de la quantité liquéfiée et le rendement thermodynamique. L'effet aussi du rendement de l'échangeur thermique n'est pas négligeable, il influe d'une manière importante sur les fonctions de performance du système.

Ce qu'on constate que les paramètres d'opération ont une influence importante sur la performance du système, on a abouti donc à :

- une augmentation de la pression  $P_2$  provoque comme avantage une obtention d'une fraction liquéfiée  $y$  importante et comme inconvénient, diminution du rendement thermodynamique FOM et l'augmentation du travail nécessaire à la liquéfaction  $w/m_f$ .

- une augmentation des deux paramètres la température  $T_3$  et la fraction  $X$  influe positivement sur la performance du système.

Une question qui se pose donc ; quel – est l'intervalle toléré pour chaque paramètre pour que le système soit fonctionnel et performant ?

Analysons les résultats et les graphes tracés et tenant compte des conditions de fonctionnement de cycle de Claude qui sont : pour le compresseur, la pression de sortie  $P_2$  il faut pas qu'elle dépasse 40 bar

- la fraction  $X$  passant par l'expandeur ne dépasse pas 80% et la somme de  $(x + y)$  doit être inférieure à l'unité.

on peut conclure que le cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, l'oxygène et l'azote sera fonctionnel et donnera une haute performance dans les conditions suivantes :

- pour le premier paramètre d'opération à savoir la pression à la sortie du compresseur doit être comprise entre 2 à 3 MPa.

- Le deuxième paramètre, la température à l'entrée de l'expandeur doit être comprise entre 280 K et 294 K.

- Et finalement, le troisième paramètre d'opération, la fraction du gaz passant par l'expandeur prend les valeurs de 0.68 à 0.70.

### 6.3 Comparaison des résultats

a) on compare les fonctions de performance des trois gaz en étude, dans les conditions de fonctionnement suivantes :

$$P_1 = 1 \text{ [atm]}, T_1 = 300 \text{ [k]}, P_2 = 2 \text{ [MPa]}, T_3 = 294 \text{ [k]}, X = 0.70, R_{cp} = 70\%, R_{ex} = 80\%, R_e = 95\%$$

L'oxygène présente un travail minimal de 1450.00 [ Kj/Kg ] plus petit que celui que

nécessite l'azote et l'air qui sont égaux à 1530.05 [ Kj/Kg ] et 1525.00 [ Kj/Kg ] respectivement.

Pour la fraction liquéfiée  $y$  égale à 0.2050 pour l'azote est plus importante que celle de l'oxygène ( $y = 0.1950$ ) et de l'air ( $y = 0.2008$ )

Quand au rendement thermodynamique, l'azote présente un bon rendement égale à 0.5000 par rapport à L'oxygène ( $FOM = 0.4000$ ) et l'air ( $FOM = 0.4904$ ).

**b)** pour évaluer, les résultats issues de cette étude, on les comparent à ceux obtenus dans la littérature [37] :

pour une pression à l'entrée du compresseur égale à 1 [atm], une température initiale égale à 300 [K] et une température à l'entrée de l'expandeur prise à 294 [K].

Le rendement global du compresseur  $R_{cp}$  égal à 70% , le rendement adiabatique et mécanique de l'expandeur égal à 80% ,le rendement de l'échangeur thermique égal à 95%.

-pour l'azote : la fraction  $X$  qui passe par l'expandeur égale à 0.76, la pression  $P_2$  à la sortie du compresseur égale à 2 [MPa] , la fraction  $y$  liquéfiée égale à 0.2371, le travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée  $w/m_f$  égal à 1211 [Kj/Kg] et un rendement thermodynamique  $FOM$  égal à 0.6156

Pour l'oxygène :  $X = 0.77$ ,  $P_2=2$  [MPa],  $y=0.2254$ ,  $w/m_f = 1108$  [Kj/Kg],  
 $FOM=0.5546$

- pour l'air :  $X=0.74$ ,  $P_2=3.3$  [MPa] ,  $y =0.2469$ ,  $w/m_f =1322$  [Kj/Kg],  
 $FOM=0.5563$

On constate que les résultats obtenus par le modèle de simulation établi dans cette présente contribution convergent malgré que les conditions de fonctionnement diffèrent légèrement.

Selon l'ouvrage [22], le cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air observé sur des installations industrielles, a consommé un travail par unité de masse du gaz liquéfiée de 3580 [Kj/Kg] et il a présenté un rendement thermodynamique de 0.201 sous les conditions initiales de température de 294.4 [K] et de pression à l'entrée du compresseur égale à 101.3 [KPa].

**Conclusion**

Considérés pendant de nombreuses années comme gaz permanents ( $N_2, O_2, H_2, \dots$ ) impossibles à obtenir sous un autre état physique. Ces gaz ont pu être liquéfiés grâce aux efforts considérables des physiciens et des chercheurs scientifiques, cette opération de liquéfaction est devenue très répandue dans l'industrie.

L'objectif principal de cette étude est d'avoir une grande quantité liquéfiée de l'air tout en consommant une énergie minimale. On a opté pour le cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'oxygène et de l'azote, vu les nombreux avantages qu'il présente. Trois paramètres d'opération de ce cycle ont été considérés et qui ont une influence importante sur les fonctions de performance à savoir, une augmentation des deux paramètres- la température du gaz à l'entrée de l'expandeur et la fraction du gaz passant par l'expandeur- influe positivement sur le travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée, sur la fraction du gaz liquéfiée et sur le rendement thermodynamique. Par contre, le troisième paramètre qui est la pression à la sortie du compresseur dont l'augmentation influe positivement sur la fraction du gaz liquéfiée et négativement sur le travail et le rendement. Un compromis, donc, entre les valeurs de la pression est fait à cet égard.

Ce travail peut avoir des perspectives, suite aux recommandations suivantes :

- chercher autres paramètres d'opération qui peuvent avoir une influence non négligeable sur la performance des systèmes de liquéfaction.
- prendre en considération le transfert de chaleur du système au milieu environnant.
- reprendre ce même modèle de simulation pour un gaz réel en appliquant l'équation de BENEDICT - WEBB - RUBIN (BWR) pour les basses températures.
- généraliser ce modèle pour d'autres gaz, exemple le gaz naturel.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] International institute of refrigeration, 1975, new international dictionary of refrigeration 3<sup>rd</sup> ed. IIF/iir, PARIS
- [2] FLECK U , KÜNDIG A, liquid hydrogen –A clean energy? Proceedings of ICEC 19, Gistou, Seyfert ed, Narosa Publishing House , New Delhi: 547-551
- [3] Information chimie – hydrogène : Quoi de nouveau ? 134,june (1977)
- [4] WILLIAMSON (K.D) et EDESKUTY (F,J) – Liquid Cryogens. Vol I : Theory and equipment Vol III Properties and Applications CRC Press.Inc (1983)
- [5] Le froid et ses applications dans l'industrie du gaz – collection des techniques gazières association technique de l'industrie du gaz en France.
- [6] WIDER G.HIGH- resolution nuclear magnetic resonance applied to biophysics and molecular biology (2002).
- [7] CLAUDET G.superfluid helium from physics laboratory to industry,Proceedings of ICEC 19, Gistou, Seyfert ed, Narosa Publishing House , New Delhi: 743.750 (2002).
- [8] CLAUDET S et Al , economics of large helium cryogenic systems : experience from recent projects at CERN ,ADV,Cryog.Eng, 45A :1301-1308 (2000).
- [9] CAILLETET, L,C.R. Acad. Sci PARIS ,85,1213 (1877).
- [10] PICTET ,R, C.R. Acad. Sci PARIS ,85,1214 (1877).
- [11] LLSZEWSKI,K, Phil,mag,39,188 (1895).
- [12] DEWAR , j, Proc .Roy .Soc,63, 256 (1898).
- [13] DEWAR , j,Collected papers of sir . J . DEWAR, Cambridge University Press (1927).
- [14] KAMELLINGH-ONNES, H ;Proc .Acad.Sci .Amst,11 ,168 (1908).
- [15] KAMELLINGH-ONNES, H ;Com,Phys.Lab.Univ.LEIDEN,119,120,122 (1911).
- [16] LONDON, H ;Proc.Int.Conf.Low Temp.Physics,157 Oxford (1951).
- [17] GIAUQUE,W.F,J Am.Chem.Soc ,49 (1927).
- [18] MENDELSSOHN,K, The Quest For Absolute Zero,Mac,Graw Hill Book (1966).
- [19] DAUNT,J. G ,Encyclopedia of physics ,14 (1956).
- [20] COLLINS,S, Encyclopedia of physics ,14,112 (1956).
- [21] CONTE .R .R éléments De Cryogénie .ed. MASSON .Paris (1970).

- [22] Technique De l'ingénieur.
- [23] PHILIPPE LEBRUN, Cryophysique et Cryoingénierie .CERN, Organisation européenne pour la Recherche Nucléaire, Bulletin de l'IIF (2003).
- [24] PIETROPINTOS et Al ,Low- température gaseous helium and very high turbulence experiments, proceedings of ICEC 19,New-Delhi :813-816 (2002).
- [25] HANDBOOK of Cryogenic Engineering (1998).
- [26] HASELDEN G.G. Cryogenic Fundamentals (1971).
- [27] A.ARKHARON Theory and design of Cryogenic Systems (1981).
- [28] G.VAN.WYLEN- Thermodynamique Appliquée – édition de renouveau pédagogique (1981).
- [29] RANDALL F.BARRON- Cryogenic Systems – Oxford university press, New York,Clarendon press, Oxford (1985).
- [30] HANBOOK Refrigeration ASHRAE (1998).
- [31] Science et technique du froid (Comptes Rendus),Munich Meeting on air séparation technology October 10 – 11 , (1996).
- [32] Revue Générale du froid , Organe Officiel de l'Association Française du Froid juillet/ août (2003) .
- [33] EDESKUTY,F,J and K.D.WILLIAMSON- liquid cryogens, vols 1 and 2 , CRC PRESS.Boca Roton, Florida (1983).
- [34] KING (C.J)- Separation Processes , Mc GRAW-HILL , BookCo , New York (1971)
- [35] DESMOND E Winterbone – Advanced thermodynamics for engineers , (1997).
- [36] R. KILING – thermodynamique générale et applications - 2<sup>ème</sup> ed (1980).
- [37] SHRI.P.U.wayse, S.K.Ponde,National symposium on « future trends in refrigeration technology »MECH.ENGG.DEPTT.WALCHAND. college of engg.sangli (avril 2002).

# **Annexes**

Annexe 1

Propriétés physiques usuelles des fluides cryogéniques (1)

Fluide		<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> He	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Température d'ébullition à p normale .....(K)		3.2	4.2	20.4	77.3	90.2
Point triple	Température .....(K)	néant	néant	13.95	63.14	54.40
	Pression..... ( 10 <sup>2</sup> Pa )	néant	néant	72	125	1.5
Point critique	Température .....(K)	3.33	5.20	33.2	126.1	154.4
	Pression ..... ( 10 <sup>5</sup> Pa )	1.16	2.23	12.8	33.1	49.5
Volume de gaz provenant de 1 L de liquide	à T d'ébullition et p normale( L)	2.5	7.3	54.6	180	260
	à T et p normale..... ( L)	455	700	790	646	798
Enthalpie de formation à la T d'ébullition et sous p normale (KJ/kg)		8.2	21	452	199	213
Enthalpie sensible entre T <sub>éb</sub> et 300K ..... (KJ/kg)		2080	1550	3800	233	193
Rapport = Enthalpie sensible / Enthalpie de formation		255	74	8.4	1.17	0.90
Taux d'évaporation ..... ( Wh /L)		0.14	0.7	9	45	68
Conductivité thermique du gaz à T <sub>éb</sub> + e et p normale. (m.W/(m.K))		*	10	15	7.6	9
Conductivité thermique du gaz à 300 K et p normale (m.W/(m.K))		*	152	181	26	27
Masse volumique du liquide bouillant à p normale ( Kg /m <sup>3</sup> )		59	125	71	810	1140
Masse volumique de la vapeur saturante à p normale. ( Kg /m <sup>3</sup> )		24	17	1.3	4.5	4.4
Masse volumique du gaz à p et T normale..... (Kg /m <sup>3</sup> )		0.13	0.18	0.09	1.25	1.43
Viscosité du liquide à T <sub>éb</sub> ..... (mPa.s )		2	3.6	13	160	190
Viscosité du gaz à T <sub>éb</sub> .....(mPa.s )		1.2	1.0	1.0	5.0	7.0
Viscosité du gaz à T ambiante..... (mPa.s )		*	20	9	17	20
Permittivité du liquide .....		*	1.05	1.23	1.44	1.48
<p>( 1 ) p normale = p atm = 1.013x 10<sup>5</sup> Pa  T normale = 273.15 K (O°C).  * non trouvé dans la littérature.</p>						