

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



**Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du Diplôme de Master en
mécanique**

Option : ENERGETIQUE

**Titre : Influence de La Pression Intermédiaire Sur
Les performances du liquéfacteur de Linde**

Proposé et encadré par :

Réalisé par :

Pr Y.Benkhedda

Krimi Yacine

Daya Mohamed Amine

Année universitaire : 2022 /2023

REMERCIEMENT

On tient à remercier avant tout le bon dieu, le tout puissant de nous avoir donné la force, la volonté et la patience nécessaire pour la réalisation de ce modeste travail.

A notre promoteur **Pr Y. BENKHEDDA** On vous remercie pour tout :
votre gentillesse, votre disponibilité, vos conseils et surtout votre confiance qui nous a permis d'exprimer notre compétence durant ce travail.

On voudrait également exprimer nos vifs remerciements aux membres de jury
pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nos remerciements aussi le chef de département mécanique

Mr KETFI OMAR.

On voudrait aussi exprimer notre profonde gratitude à nos familles pour leur soutien moral et leur encouragement prodigué pendant tous ces années d'études.

Notre reconnaissance va également à tous nos amis.

Résumé :

Le but de ce travail est de procéder à l'étude de l'influence de la pression intermédiaire sur les performances du liquéfacteur de **Linde**, a fin de déterminer les facteurs qui influent sur les performances du cycle et obtenir le meilleur point de fonctionnement sur une base de calcul établi sur les différents paramètres.

Mots clé : cryogénie ; **cycle de Linde** ; pressions intermédiaires.

Abstract :

The purpose of This work is to study the influence of the intermediate pressure on the performance of the **Linde** liquefier, in order to determine the factors that influence the performance of the cycle and to obtain the best operating point on the basis of a calculation established on the different parameters.

Keyword : cryogenic ; **Linde cycle** ; intermediate pressures.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير الضغط الوسيط على أداء تكييف ليند ، من أجل تحديد العوامل التي تؤثر على أداء هذه الدورة ومحاولة الحصول على أفضل نقطة عمل لدورة ليند . بعد إجراء عمليات على مختلف العوامل المؤثرة .

كلمات مفتاحية :

درجات الحرارة المتدنية , دورة ليند, الضغوط الوسيطة.

Sommaire

REMERCIEMENT

Sommaire

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Introduction générale:	1
Chapitre I :Généralité Sur la cryogénie.....	1
I.1.Introduction:.....	3
I.2. Histoire de la cryogénie dans le monde :	3
1.4. Les propriétés physiques aux basses températures	12
1.4.1.Les propriétés des fluides cryogéniques :	12
1.4.2. Les propriétés des matériaux :.....	13
1.4.3. Propriétés thermiques :.....	13
1.4.4. Propriétés mécaniques :.....	13
I.5. Transfert thermique :.....	14
I.5.1. Conduction :.....	14
I.5.2. Convection :.....	14
I.5.3.Rayonnement :	15
I.6 .Conclusion :	15
Chapitre II : Les FluidesCryogéniques.....	16
II .1.INTRODUCTION :.....	17
II.2.Propriétés des fluides cryogéniques :	17
II.2. 1. Azote :.....	17
II.2. 2. Oxygène :.....	17
II.2.3. méthane :.....	17
II.3. Principe application de L'azote :.....	18
II.4 .Stockage et transport de l'azote : :	19

1/ Le vide:.....	20
2/ Isolation multicouche :	20
3/ Isolation en mousse :.....	20
4/Isolant en poudre et fibreux :	20
5/ Isolants spéciaux :	20
II .6 .Conclusion :.....	21
Chapitre III : Le cycle de Liquéfaction Linde	22
III-1- INTRODUTION :.....	23
III-2- Historique :	23
III-3- La Liquéfaction :	24
III-4- Cycle de Linde (Cycle idéal de liquéfaction) :	25
III-5- Détente de Joule-Thomson (Joule-Kelvin) :.....	27
III .6 .Conclusion.....	30
Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A Deux Compresseur Et Doubles Détentes	31
IV.1Rappel thermodynamique :	32
IV.1.1Premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert :.....	32
IV.1.2Bilane énergétique :	33
IV.2.Cycle de Linde à 2 compresseurs :.....	34
IV.2.1.Principe de fonctionnement :	34
.IV.2.2. Schéma de cycle de Linde à deux compresseurs et leurdiagramme T-S :	35
IV.3.Les performances et les paramètres à calculer :	36
IV.4.Paramètres d'opération d'un système de liquéfaction :	39
IV.5.Les Paramètres calculé sont :	39
IV.6.conclusion.....	41

Résultats et affichage

V.1. Influence de la pression intermédiaire sur lesperformances du cycle avec (I) différents :....	46
--	----

V.2. Influence de rapport massique ($i=m_i/m$) sur les performances du cycle à $p=60(\text{atm})$:	52
V.2.a. L'effet sur La fraction de gaz liquide (Y):	52
V.2.b. L'effet sur le travail requis par unité de masse (W/m):.....	53
V.2.c. L'effet sur Le travail de masse liquéfiée (W/mf) :	54
V.3. La variation de FOM en fonction de (Y) de azote Pour différent i:	55
V.4.Conclusion :.....	58
Conclusion générale	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:	62

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : l'appareil de Cailletet.

Figure I-2: système de réfrigération et de liquéfaction en cascade.

Figure I.3 : laboratoire de tripler montrant un compresseur d'air multi étagée et un liquéfacteur à air.

Figure I.4 : usine de gaz d'azote pour alimenter la raffinerie d'huile Esso Fawley.

Figure I.5 : un schéma d'un des trois moteurs de fusée shuttle.

Figure I.6 : une coupe transversale de joint européen tours.

Figure II.1 : les cuves de stockage.

Figure III.1 : Composition de l'air sec.

Figure III-2 : Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz

Figure III-3 : Expérience de Joule-Thomson

Figure III-4 : Diagramme T-P pour un gaz réel et Courbe d'inversion de la détente de Joule-Thomson

Figure IV.1 : Schéma et principe de fonction pour le cycle de Linde

Figure IV.2 : Diagramme T-S pour le cycle de Linde

Figure IV.3 : volume de control V1

Figure IV.4 : volume de contrôle V2

Figure V.1 : Diagramme du travail requis par unité de masse en fonction de pression intermédiaire pour l'**azote**

Figure V.2 : Diagramme du travail requis par unité de masse en fonction de pression intermédiaire pour l'**Oxygène**

Figure V.3 : Diagramme du travail requis par unité de masse en fonction de pression intermédiaire pour **Méthane**

Figure V.4 : Diagramme de La fraction de gaz liquide en fonction de la pression intermédiaire pour l'**azote**

Figure V.5 : Diagramme de La fraction de gaz liquide en fonction de la pression intermédiaire Pour l'**Oxygène**

Figure V.6 : Diagramme de fraction de liquide en fonction de la pression intermédiaire

Pour **Méthane**

Figure V.7 : Diagramme du travail de masse liquéfiée en fonction de pression intermédiaire Pour l'**azote**

Figure V.8 : Diagramme du travail de masse liquéfiée en fonction de pression intermédiaire

Pour **Méthane**

Figure V.9 : Diagramme du travail de masse liquéfiée en fonction de pression intermédiaire

Pour l'oxygène

Figure V.10 : Diagramme de FOM en fonction de pression intermédiaire pour l'azote

Figure V.11 : Diagramme de FOM en fonction de pression intermédiaire pour méthane

Figure V.12: Diagramme de FOM en fonction de pression intermédiaire pour L'oxygène

Figure V.13: Diagramme de (Y) en fonction de rapport massique (i) avec P=cts

Figure V.14 : Diagramme de W/m en fonction de rapport massique (i) avec P=cts

Figure V.15: Diagramme de W/mf en fonction de rapport massique (i) avec P=cts

Figure V.16: Diagramme de FOM en fonction de rapport massique (i) avec P=cts

Figure V.17 : Diagramme de la variation de FOM en fonction de Y pour i=0.8

Figure V.18 : Diagramme de la variation de FOM en fonction de Y pour i=0.6

Figure V.19 : Diagramme de la variation de FOM en fonction de Y pour i=0.5

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : points d'ébullition des gaz de l'air

Tableau II.1 : les applications d'azote

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

Tableau IV.1 : les paramètres P, T, S, H de azote aux chaque points du cycle pour une pression intermédiaire 5atm

Tableau IV.2 : les paramètres S, H de azote aux chaque points du cycle pour différents pression intermédiaire

Tableau IV.3 : les paramètres P, T, S, H de méthane aux chaque points du cycle pour Une pression intermédiaire 5atm

Tableau IV.4 : les paramètres S, H de méthane aux chaque points du cycle pour différents pression intermédiaire

Tableau IV.5 : les paramètres P, T, S, H de O₂ aux chaque points du cycle pour une pression intermédiaire 5atm

Tableau IV.6 : les paramètres S, H de O₂ aux chaque points du cycle pour différents pression intermédiaire

ANNEXES

[ANNEXES 1] Diagramme (T-S) de l'azote

[ANNEXES 2] Diagramme (T-S) d'oxygène

[ANNEXES 3] Diagramme (T-S) de méthane

Introduction Générale

Introduction générale:

La cryogénie, un terme utilisé pour désigner les très basses températures (températures inférieure à -173°C environ).cette température représente la limite à partir de laquelle les principaux gaz atmosphérique (méthane, oxygène, azote, hydrogène et hélium) se liquéfient.

Elle est utilisée dans de nombreux domaines, notamment la recherche scientifique, la médecine et l'industrie.

La relation entre la cryogénie et la médecine est très répandue dans la conservation des organes et les Vaccins ainsi que la cryothérapie (insuffisance respiratoire)

Dans industrie automobile, le cryofrettage est très utilisé (Freins ABS).

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 de travail ? En quelque sorte, jouant sur quels paramètres pour pouvoir améliorer la performance de ce cycle dans ce travail.

L'objectif, donc, de cette étude est la recherche de ces paramètre appliqués sur le cycle de **LINDE** pour la liquéfaction et obtenir une meilleur performance.

Dans ce travail on a cinq chapitres, le premier chapitre est consacré pour généralité sur la cryogénie et leurs propriétés physiques, la deuxième chapitre est une recharge bibliographique sur les fluides cryogéniques et principe application de L'azote et leur Stockage et transport, la troisième chapitre on a parlé sur la Liquéfaction de cycle de Linde (Cycle idéal et Détente de Joule-Thomson), et le quatrième chapitre est une étude thermodynamique et énergétique sur le cycle de Linde, la chapitre final est consacré aux résultats et discussions de notre travail . Nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralité

Sur la cryogénie

I.1. Introduction:

La cryogénie est définie comme l'étude scientifique des matériaux et de leurs propriétés Comportement à très basse température. le mot vient du grec 'Cryo', signifiant "froid", 'génique', signifiant "production". Le terme est couramment utilisé dans les domaines de la physique, de la science des matériaux et de la médecine. Les scientifiques qui étudient la cryogénie sont appelés "cryogénistes", et les matériaux à basse température peuvent être appelés "cryogènes". [1]

La question qui se pose à quel point une substance doit être considérée comme "cryogénique" doit faire l'objet d'un débat au sein de la communauté scientifique. L'Institut national des normes et de la technologie des États-Unis (NIST) considère que la cryogénie comprend les températures inférieures à -180 ° C ($93,15\text{ K}$), soit une température au-dessus de laquelle les réfrigérants courants (par exemple, le sulfure d'hydrogène, le fréon) sont des gaz et en dessous de quels 'gaz permanents" (par exemple, air, azote, oxygène, néon, hydrogène, hélium) sont des liquides. Il existe également un domaine d'étude appelé "cryogénie à haute température", qui implique des températures supérieures au point d'ébullition de l'azote liquide à pression ordinaire ($-195,79\text{ ° C}$ ($77,36\text{ k}$), jusqu'à -50 ° C ($223,15\text{ K}$);)

La mesure de la température des cryogènes nécessite des capteurs spéciaux. [2]

I.2. Histoire de la cryogénie dans le monde :

• 1877 le Début de la cryogénie :

En 1877, Cailletet et Pictet établissent le point de départ de la cryogénie en liquéfiant l'oxygène, le premier des gaz dits permanents à être liquéfié. Le terme "permanent" dérive du fait expérimentalement établi que de tels gaz "permanents" ne peuvent pas être liquéfiés à température ambiante par la seule pression.

• Glace naturelle et glace artificielle en 1877 :

L'utilisation de la glace naturelle dans les aliments remonte à loin. Les Chinois l'utilisaient dans la nourriture, tandis que les Romains mélangeaient la neige et les jus de fruits pour faire des sorbets.

Premièrement, le développement des machines frigorifiques et des compresseurs de gaz associés pour la fabrication de glace artificielle a parcouru un long chemin depuis 1850. [3]

• Cailletet Paris, décembre 1877 :

La figure (I-1) montre l'appareil utilisé par Cailletet pour produire un brouillard momentané de Gouttelettes d'oxygène dans un tube de verre à paroi épaisse (P). L'oxygène gazeux à été comprimé à l'aide du compresseur la pression atteignant 200 atm ont été générées par un vérin a vis à commande manuelle. la pression était transmise à l'oxygène gazeux dans le tube de verre par transmission hydraulique utilisant de l'eau et de mercure.

Le gaz est refroidi à -110°C en entourant le tube de verre avec de l'éthylène liquide, puis le gaz est soudainement détendu en relâchant la pression à travers le volant (O). Une buée momentanée est observée et le processus peut être répété pour

Afin que d'autres observateurs puissent voir le phénomène. [3][2]

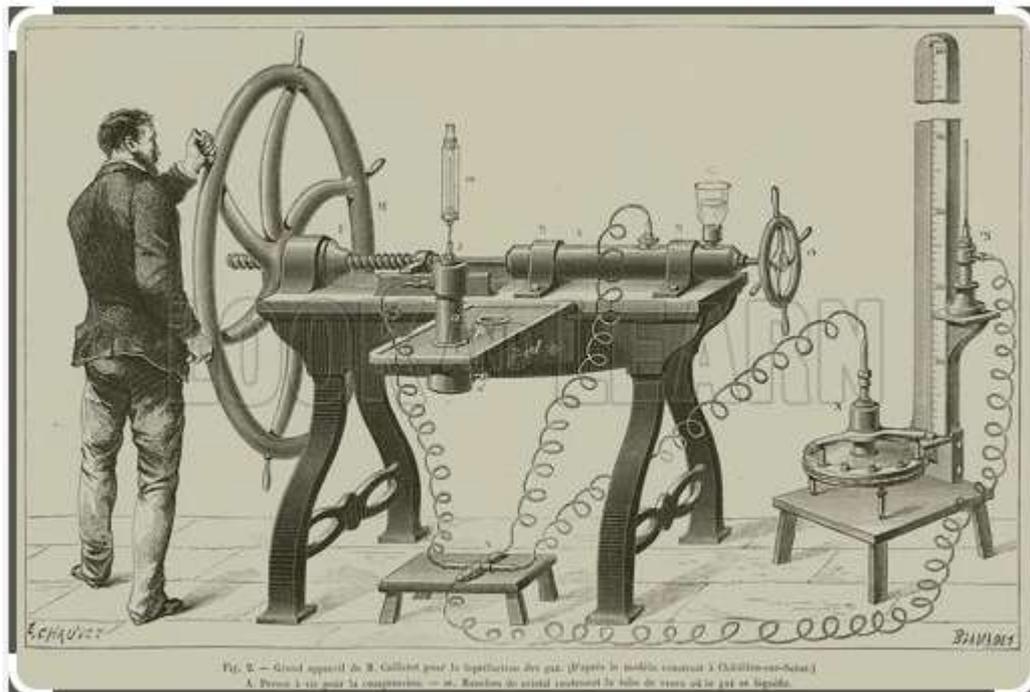


Figure I.1 : l'appareil de Cailletet

•Pictet : Genève, décembre 1877 :

La figure (I-2) est le système de réfrigération en cascade Pictet,

Dans lequel l'oxygène est d'abord refroidi par du dioxyde de soufre, puis par du dioxyde de carbone liquide dans un échangeur de chaleur, puis rejeté dans l'atmosphère en ouvrant une vanne (N).

La figure (I-2) montre comment Pictet a utilisé les compresseurs entraînant des cycles de réfrigérant SO_2 (-20°C) et CO_2 (-60°C) continu. Il s'agit peut-être du premier exemple d'un système de réfrigération en cascade fonctionnant à plusieurs niveaux de température. [3]

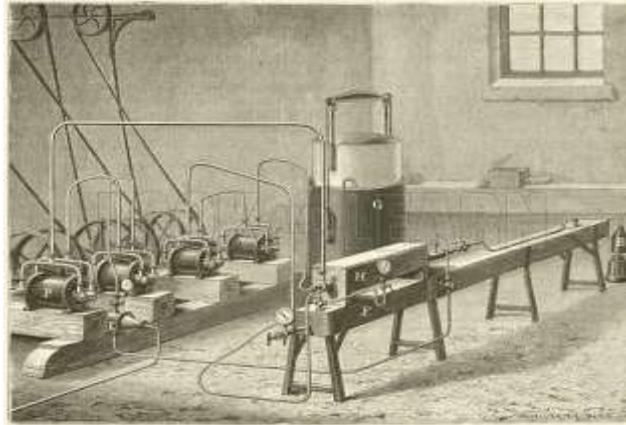


Figure I-2: système de réfrigération et de liquéfaction en cascade

• 1882 : Le Laboratoire cryogénique à Leiden :

En 1882, Kamerlingh Onnes entreprit de créer un laboratoire cryogénique à l'Université de Leiden aux Pays-Bas. Son laboratoire s'inspire essentiellement des travaux systématiques de van der Waals à Amsterdam puis à Leiden sur les propriétés des gaz et des liquides. En 1866,

Van der Waals a publié le premier article sur "La continuité des états liquides et gazeux", à partir duquel il a développé une compréhension physique de l'état critique, de la liquéfaction et de l'évaporation, et il a réussi à découvrir la supraconductivité en 1911

• 1895 : Liquéfaction de l'air par les ingénieurs :

Dix-huit ans après la première liquéfaction de l'oxygène, peu de progrès ont été réalisés dans la liquéfaction. Puis, en 1895, Hampson à Londres et Linde à Munich ont breveté simultanément un liquéfacteur d'air compact et efficace qui utilisaient le refroidissement auto-intensif.

En 1898, l'ingénieur new-yorkais Charles Tripler a construit un liquéfacteur similaire mais plus grand, alimenté par une machine à vapeur de 75 kilowatts qui produisait plusieurs litres d'air liquide par heure. **(Figure I-3).**

En 1902, Georges Claude, un jeune ingénieur français novateur qui réussit à construire un moteur à détente à piston fonctionnant aux basses températures nécessaires à la liquéfaction de l'air, était bien connecté dans la communauté scientifique parisienne. L'effet de refroidissement est amélioré par rapport à la détente Joule-Thomson.

Claude a ensuite développé le liquéfacteur d'air avec régulateur de pression

Pistons pour la nouvelle société Air Liquide. [2]

En 1906, la Breen Oxygène Compagnie, basée à Westminster, à Londres, Hampson et Linde, ont réussi à la production et la distillation d'air liquide afin de produire de l'oxygène. La société a ensuite été rebaptisée British Oxygène Compagnie (BOC).

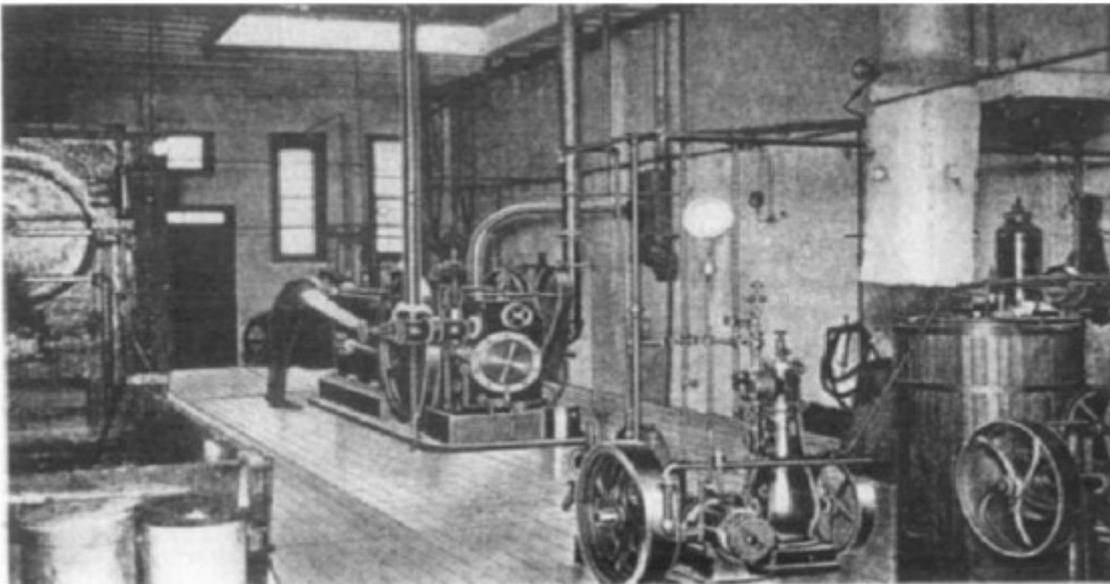


Figure I.3 : laboratoire de tripler montrant un compresseur d'air multi étagée et un liquéfacteur à air.

• La distillation de l'air liquide pour les applications industrielles :

L'air liquéfié en tant que tel présentait peu d'intérêt commercial : c'est la composante d'oxygène et sa séparation de l'air liquide à un coût relativement bas qui ont donné naissance à la

première application commerciale de la liquéfaction de l'air coûteux à produire par des voies chimiques telles que l'adsorption réversible sur l'oxyde de baryum chauffé. [3]

Aujourd'hui, la demande globale en azote a dépassé celle en oxygène un taux de croissance extraordinaire, presque nul dans les années 1960. (Figure 1-4) montre une usine récemment mise en service à Fawley, au Royaume-Uni, destinée à alimenter le complexe de raffinerie de pétrole Esso Fawley adjacent en azote. Cette usine est également conçue pour éliminer la majeure partie de l'argon de l'air traité. L'air contient 0,9% d'argon, un gaz totalement inerte chimiquement, même à haute température. Au cours des 20 dernières années, la demande d'argon, en tant que gaz de protection dans le soudage à l'arc et dans l'industrie métallurgique de haute technologie, a augmenté encore plus rapidement que la demande d'azote. Toutes les nouvelles installations de distillation cryogénique de l'air incorporent une colonne de distillation secondaire pour l'élimination de l'argon. L'usine Fawley est un exemple. Pour les grands utilisateurs des gaz industriels, il peut être justifié de prévoir une usine de séparation d'air de tonnage voisin. Vous avez envoyé Cependant, de nombreux utilisateurs tels que les réparateurs de navires, les fabricants de produits métalliques et les congélateurs, ont besoin de petites quantités de manière irrégulière. Pour eux, le moyen le plus commande de stocker et de manipuler les gaz consiste à utiliser du liquide. La réduction de volume entre l'oxygène ou l'azote gazeux à la pression atmosphérique et l'état liquide est d'environ 700 fois. Les conteneurs isolés sont très légers comparés au poids du gaz liquide contenu et la distribution du gaz liquéfié est une industrie bien organisée. Les camions citernes sont couramment utilisés pour distribuer de l'azote liquide, de l'oxygène et de l'argon chez le client.



Figure I.4 : usine de gaz d'azote pour alimenter la raffinerie d'huile Esso Fawley

• Gaz naturel liquéfié (GNL) :

Le gaz naturel liquéfié (GNL) consiste principalement en méthane, a une densité de 450kg/m³ et une température d'ébullition de 112 K (- 161 ° C). Le GNL est une source d'approvisionnement en énergie et en produits chimiques de première qualité et fait aujourd'hui partie intégrante du paysage énergétique mondial. Les réservoirs souterrains de gaz naturel sont très répandus, qu'ils soient associés au pétrole brut extrait des puits de pétrole comme dans le golfe Persique ou à des champs de gaz tels que ceux de l'Algérie ou de la moitié sud de la mer du Nord. Bien que les gazoducs coûtent moins cher sur quelques centaines de kilomètres, le transport du gaz sous forme de liquide cryogénique devient plus économique pour des distances supérieures à milles. L'utilisation possible du gaz naturel sous forme liquide à 112K est à l'étude dans de nombreux pays depuis 1936, année de la construction du premier GNL liquéfié à Kharkov (URSS), conçu par Ruhemann.

Le premier site industriel a été installé à Cleveland (Etats-Unis) en 1941 avec une capacité de 200 m³ par jour de GNL. En 1944, un réservoir de stockage tomba en panne et l'usine entière et les propriétés voisines furent détruites, entraînant la perte d'environ 200 vies. C'était 20 ans avant la mise en service de la prochaine opération commerciale de GNL en 1964 pour la liquéfaction, le transport maritime, la manutention et le stockage du GNL entre Arzew (Algérie) et Canvey Island (Royaume-Uni). Avec une meilleure compréhension des propriétés des matériaux et des normes de sécurité améliorées, le secteur du GNL est devenu un élément de plusieurs milliards de livres dans le secteur de l'énergie. Le développement de pétroliers géants, capables de transporter 125 000 m³ de GNL, a eu lieu au cours des 20 dernières années. Il en va de même pour la chaîne de réfrigération associée aux usines de liquéfaction, aux stockages et terminaux d'exportation, aux terminaux d'importation et réservoirs de stockage, ainsi qu'aux vaporisateurs de liquide. Les réservoirs de 70 m de haut et de 70 m de diamètre sont couramment utilisés. Ils contiennent chacun environ 250000 m³ de GNL ; assez pour l'ensemble du Royaume-Uni pendant une semaine

L'échelle de l'ingénierie cryogénique dans ces entreprises de GNL est assez impressionnante. Tout a été mis au point depuis les premières expéditions d'essais transatlantiques du North Thames Gas Board (qui fait maintenant partie de la British Gas Corporation) du golfe du Mexique à Canvey Island, qui a démontré la faisabilité du transport maritime de GNL en 1960. Le développement a été réalisé par la technologie britannique et française pour l'industrie du pétrole et du gaz Aujourd'hui, le GNL est une industrie mondiale,

limitée uniquement par les investissements nécessaires pour liquéfier le gaz naturel actuelle « en flammes » et gaspillé en tant que ressource énergétique dans la plupart des champs pétroliers.

• Hydrogène et oxygène pour les propulseurs de fusée :

L'utilisation des liquides cryogéniques dans les fusées spatiales, les satellites et les sondes spatiales sont de l'ordre de deux ordres de grandeur, plus petite échelle. Il ne fait aucun doute que le développement de la technologie spatiale actuelle aurait été impossible en absence de la cryogénie. La raison principale en est la forte impulsion spécifique (impulsion totale par unité de masse de propulseur consommée) pouvant être atteinte avec kérosène / oxygène liquide (2950 m s⁻¹) et hydrogène liquide / oxygène liquide (3840 m s⁻¹) - valeurs beaucoup plus élevée qu'avec des propergols liquides ou solides stockés à la température ambiante.

Le premier test de vol d'une fusée à combustible liquide utilisant de "oxygène / essence" liquide a été réalisé par Goddard en 1926. Cependant, il s'agissait de la mise au point de la fusée V2 utilisant l'oxygène / kérosène" liquides comme agents propulseurs pendant la seconde guerre mondiale par l'Allemand Pecnamunde équipe qui a ouvert la voie à la technologie des fusées. La cryogénie spatiale s'est développée rapidement au début des années 1960, parallèlement à la technologie GNL, pour la série de fusées Apollo Moon. La concurrence entre les Etats-Unis et la Russie dans l'exploration de l'espace et de la surface de la Lune en particulier, ainsi que dans le maintien de la détente dans la guerre froide, a été le moteur de ce développement. Parmi les exigences particulières à l'époque et maintenant dans la série des vols de la navette spatiale, figurent l'utilisation de l'hydrogène liquide comme carburant propulsif, de l'oxygène liquide comme oxydant propulsif et des systèmes de maintien de la vie, à la fois liquides pour l'alimentation électrique de la pile à combustible et pour hélium liquide. Mettre les réservoirs de propulseur sous pression.

Le développement réussi de la technologie cryogénique nécessaire a fourni une gamme extraordinaire de retomber et un niveau de confiance remarquable dans la conception, la construction et la manipulation de systèmes cryogéniques. La figure montre le lancement du lanceur de la navette spatiale avec son moteur de fusée "hydrogène / oxygène" assisté par les deux fusées à propergol solide. **(Figure I-5)** est un schéma d'un des trois moteurs de fusée Shuttle et illustre la plomberie cryogénique simple qui permet à ces moteurs de fonctionner avec une puissance variable via une commande d'accélérateur; un moteur à réaction. La figure montre

Ariane 3 , le lanceur spatial européen, qui constitue peut-être un moyen moins coûteux de mettre des satellites en orbite terrestre.[3]

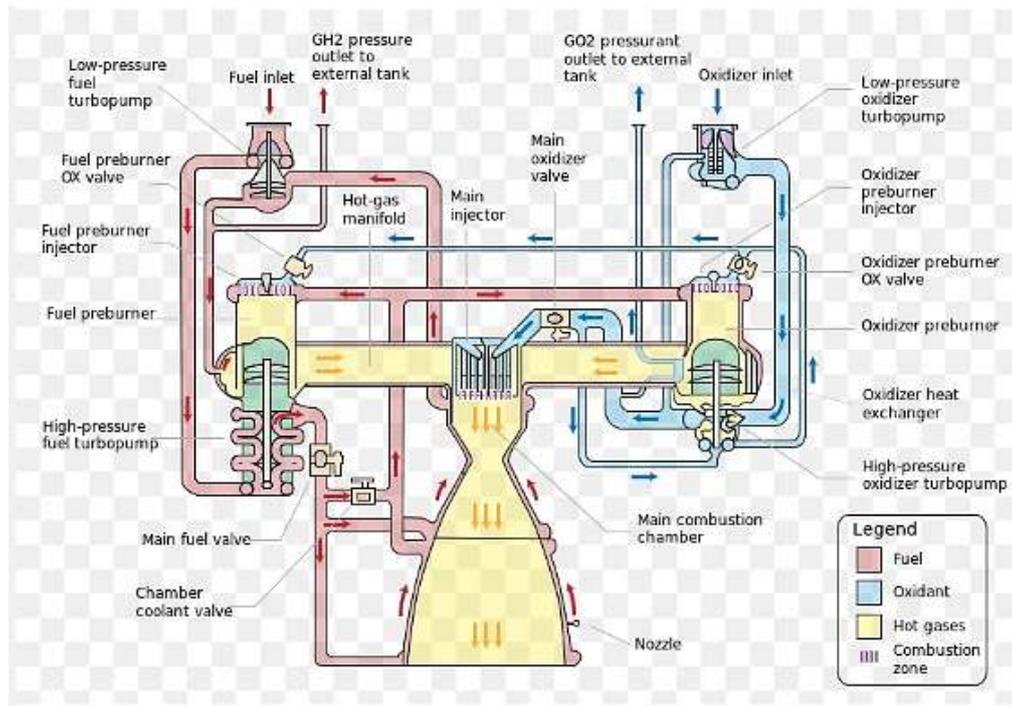


Figure I.5 : un schéma d'un des trois moteurs de fusée shuttle .

• Réacteurs de fusion, jets et réseaux I

Des études de recherche de plus en plus importantes et coûteuses depuis la fin des années 1950 ont montré que les réacteurs de fusion nucléaire, dans lesquels des noyaux d'hydrogène fusionnent pour produire de l'hélium avec la libération nette d'énergie, dépendront de control et mise en forme de grands volumes de plasma ou gaz hautement ionisé à basse pression. Des volumes encore plus importants de champs magnétiques élevés seront utilisés pour contrôler le plasma et ceci ne peut être réalisé que par l'utilisation d'aimants supraconducteurs très grands - une application de la cryogénie à laquelle "je reviendrai plus tard. (Figure I-5) Montre une coupe transversale de Joint Européen Tors (JET) à Culham, au Royaume-Uni, qui est une machine expérimentale et "beaucoup trop petite pour produire de l'énergie par fusion nucléaire. La figure indique la taille considérable des bobines du tore et du champ magnétique. Le prochain « Torus européen » (NET) qui sera construit dans les années 90 sera considérablement plus grand, mais on notera qu'il s'agit d'un réacteur produisant de l'énergie. Il convient de noter de la Supraconductivité. [3]

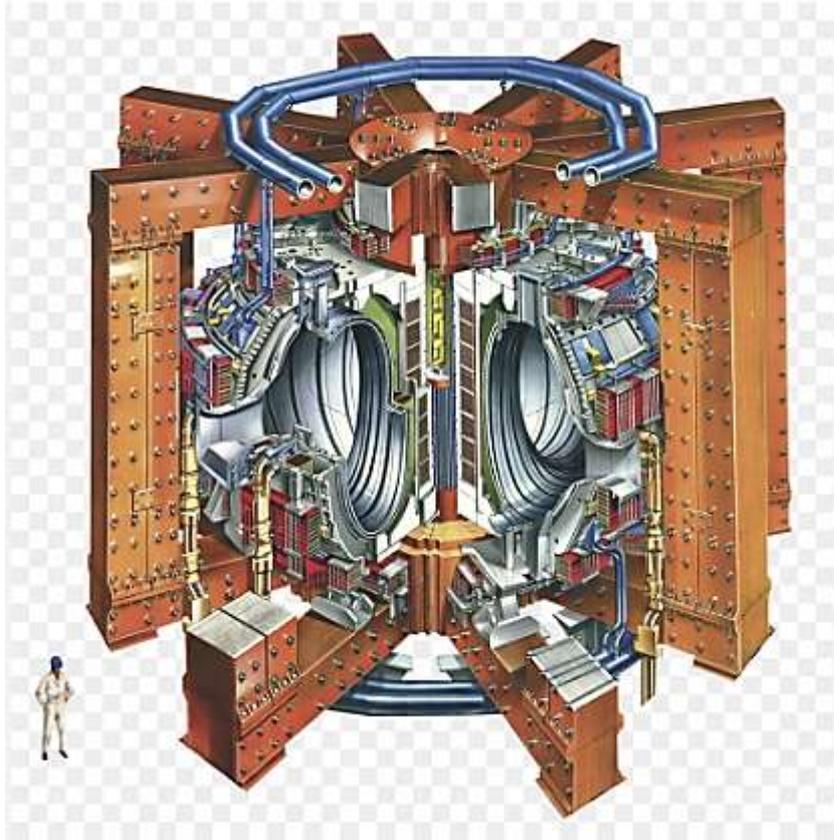


Figure I.6 : une coupe transversale de joint européen tours

I.3. Points d'ébullition des composants de l'air : [4]

Les points d'ébullition des composants de l'air, représenté par le tableau, sont mesurés à la pression atmosphérique et sont sujets à des variations de pression.

L'échelle de Kelvin, au point zéro absolu, qui est de -273.15°C et la température qui peut exister dans l'univers. Les unités de Kelvin sont employées couramment dans la science et la technologie cryogéniques, car elles sont beaucoup plus pratiques. [4]

L'eau	273k
Propane	231k
Ethane	169k
Methane	112k
Oxygen	90k
Argon	87k
Azotes	77k
Hydrogen	20k
Helium	4k



Tableau I.1 : points d'ébullition des gaz de l'air

1.4. Les propriétés physiques aux basses températures [5] [6] [7]

1.4.1. Les propriétés des fluides cryogéniques :

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 modérés, les cryogènes sont souvent utilisés dans le domaine super critique; 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 [5] [7]

1.4.2. Les 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 surconducteurs électriques, Matériaux de structure...

1.4.3. 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.). [5] [6]

1.4.4. Propriétés mécaniques :

Lorsqu'on construit une « structure » cryogénique, il est essentiel de prendre en compte les propriétés mécaniques des matériaux 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 15 restent ductiles jusqu'aux très basses températures.

Les systèmes cubiques centrés (C. C) tels que le fer α , les aciers ferritiques ; les aciers au carbone, Les aciers au nickel ($\ll 10\%$), 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. Ils sont parfois fragiles, (zinc), parfois ductiles (titane), leur ductilité étant toutefois diminuée par la présence d'impuretés et principalement par l'O₂, N₂, H₂, ... [5] [7]

I.5. Transfert thermique :

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. [7]

I.5.1. 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 : $\phi = -K.S.(dt/dx)$

Avec ϕ : flux de chaleur en [W] passant à travers la section S en [m²] au dl 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). [5]

I.5.2. Convection :

C'est le transfert d'énergie thermique par déplacement macroscopique de matière. On peut écrire : $\phi = H.S. (T_P - T_F)$

Avec :

- **H**: coefficient de convection en [W/m². K].

- **S**: surface d'échange en [m²].
- **TP** : Température de la paroi en [K].
- **TF** : Température du fluide loin de la paroi en [K].

I.5.3. 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 m à température ordinaire à 725 m à 4 K.

L'énergie '**W_r**' émise par rayonnement d'une surface '**A**' est donnée par l'équation de STEFAN BOLTZMANN : $W_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T^4$

Avec :

- **W_r** : Énergie rayonnée exprimée en [Watts].
- **E**: pouvoir émissif de la surface [A].
- **σ**: Constante de S. B : $5,67 \cdot 10^{-12}$ [W.cm⁻².K⁻⁴].
- **T**: température en [K].

L'énergie rayonnée entre deux surfaces de températures T1 et T2 (T2 > T1)

S'écrit :

$$W_r = \sigma \cdot \epsilon_r \cdot A_r \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Avec :

- **A_r** : aire en cm² de la surface qui reçoit l'énergie à température T1.
- **ε_r** : facteur qui tient compte des pouvoirs émissifs e2 et e1 des surfaces aux températures T1 et T2. [5].

I.6 .Conclusion :

Ce chapitre est relatif à l'histoire de la cryogénie dans le monde et leurs propriétés physiques aux basses températures (Les propriétés des fluides cryogéniques, des matériaux, thermiques et mécaniques, aux différents transferts thermiques : **Conduction**, **Convection** et **Rayonnement**).

Chapitre II :

Les Fluides

Cryogéniques

II.1. INTRODUCTION :

Les gaz dans l'air, souvent appelés « gaz industriels », font partie de notre quotidien et touchent toutes les industries. Tout a commencé par l'électrolyse de l'eau afin d'en extraire de l'oxygène à usage médical, les premiers clients étaient donc les pharmaciens, ce qui s'est passé dans les années 1890. En 1895, CARLVAN LINDE et GEORGES CLAUDE développent en parallèle deux méthodes, ce qui conduit à la production industrielle de l'air liquide, puis des gaz qui le composent (azote et oxygène...).

II.2. Propriétés des fluides cryogéniques :

II.2.1. Azote :

Bouillonne à 77,36 K, Ressemble à l'eau en apparence de masse volumique 807 kg/m³ (L'eau - 1000 kg/m³).

- Existe en 2 isotopes stables : N14 et N15.
- La chaleur de vaporisation est de 199.3kJ (eau 2257kJ/kg) et il est obtenu par distillation d'air liquide.

II.2.2. Oxygène :

De couleur bleue - en raison des longues chaînes d'O₄.

- Bouillonne à 90,18 K et gèle à 54,4 K.
- Densité de 1141 kg/m³ (eau - 1000 kg/m³).
- O₂ est légèrement magnétique et existe en 3 isotopes - 016, 017, 018

II.2.3. méthane :

Le méthane (CH₄) est un gaz naturel incolore et inflammable.

- Bouillonne à -161°C et gèle -182 °C
- Il a une densité de 424 kg/m³ (liquide).
- Existe en 2 isotopes stables : ¹²CH₄ ; ¹³CH₄

II.3. Principe application de L'azote : [8]

Activités	Application
Chimie et pétrochimie	Protection de la qualité des produits et des installations.
Alimentaire	Froid cryogénique pour surgeler, congeler et refroidir (azote liquide)
Artisans et, entrepreneurs, automobile	Détection de fuite par gaz traceur avec le mélange N ₂ -H ₂ (95/5)
Verre	Inertage du bain d'étain sur les lignes de fabrication du verre (float)
Santé	Conservation à basse température des cellules et tissus vivants (azote liquide)
Laboratoires	Utilisé pur ou en mélanges pour les analyses et le contrôle qualité en milieu industriel et hospitalier Gamme ALPHAGAZ™
Construction mécanique/métallique	Traitement thermique de divers métaux Coupage laser (pur ou en mélange avec d'autres gaz) Gamme LASAL™
Semi-conducteurs	Utilisé ultra-pur pour la protection globale contre les impuretés et l'oxydation. Gamme ALPHAGAZ

Tableau II.1 : les applications d'azote

II.4 Stockage et transport de l'azote : [9][10][11] :

Le stockage de gaz cryogéniques à l'état liquide est assuré par des grandes citernes qui gardent les basses pressions.

• Réservoirs cryogéniques fixes :

Un réservoir de double paroi isolé thermiquement pour être utilisé avec un ou plusieurs fluides cryogéniques, est composé d'un réservoir interne, d'une enveloppe extérieure et du système de tuyauteries associé. Ce réservoir fixe n'est pas destiné à être transporté plein. Il peut être transporté d'un emplacement fixe à un autre, vide ou contenant des quantités marginales de fluide cryogénique à moins de 2 Bar effectifs.

• Réservoir intérieur :

Le récipient sous pression destiné à contenir le fluide cryogénique. Construit en acier cuivre et le nickel.

• Enveloppe extérieure :

L'enceinte, étanche à l'air, qui supporte le réservoir intérieur, contient l'isolation et permet d'établir le vide. Construit en acier. [9][10]

• Les différents isolants :

Les différents types d'isolants utilisés pour le stockage et le transfert de liquides cryogéniques peuvent être classés en cinq catégories : (1) le vide; (2) isolation multicouche; (3) isolant en poudre et fibreux; (4) isolation en mousse ; et (5) isolants spéciaux.

La conductivité thermique du matériau étant un facteur important ainsi que d'autres critères qui doivent être aussi 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).

1/ Le vide:

L'efficacité de l'isolation sous vide réduit au minimum les pertes de chaleur dans les systèmes cryogéniques. La propriété isolante entre deux surfaces maintenues à des températures différentes est due à la minimisation des mécanismes de transfert de chaleur radiatifs, convectifs et conductif.

2/ Isolation multicouche :

Le concept d'isolation multicouche (ML) a été motivé par la volonté de minimiser tous les modes de transfert de chaleur possibles.

3/ Isolation en mousse :

Les isolants en mousse cryogénique, tels que le polystyrène et le polyuréthane, sont produits par expansion gazeuse de solides organiques ou inorganiques. Les gaz de détente les plus courants sont le dioxyde de carbone et le fréon. Ce mélange de gaz solide crée un matériau de faible densité avec de nombreux vides.

4/Isolant en poudre et fibreux :

Les principaux attributs d'un isolant en poudre comprennent une faible conductivité thermique, une faible densité et une distribution granulométrique afin de minimiser les effets de choc et de vibration. Les poudres peuvent être utilisées soit sous vide, soit gaz rempli.

5/ Isolants spéciaux :

Le système d'isolation optimal doit combiner entre l'efficacité thermique maximale, le poids minimal et la facilité de fabrication. Bien qu'il soit souhaitable d'utiliser un seul matériau isolant, aucun isolant ne présente toutes les caractéristiques physiques et de résistance parfois nécessaires. [11]



Figure II.1 : les cuves de stockage

Les lignes de transfert peuvent être classées en deux catégories : lignes non isolées et lignes isolées. Le choix de l'un des modes d'isolation dépendra de l'utilisation prévue et des considérations économiques.

- **Lignes non isolées :**

Des lignes non isolées sont couramment employées pour le remplissage de conteneurs de stockage en azote ou oxygène liquide, à partir de citernes mobiles. Les lignes sont parcourues par un débit de fluide important pendant des temps relativement courts.

- **Lignes isolées :**

Dans ce type de lignes, le tube dans lequel circule le fluide cryogénique est placé dans une enveloppe ou dans l'espace inter-parois, règne un vide poussé. La construction de telles lignes est très voisine de celle des conteneurs de stockage. [11][12]

II .6 .Conclusion :

Le chapitre II est destiné aux Propriétés des fluides comme : azote, Oxygène, méthane, et Principe application de L'azote et leur transport et stockage.

Chapitre 3 :

Le cycle de

Liquéfaction

Linde

III-1- INTRODUCTION :

Le **procédé Linde** est une technique de liquéfaction des gaz mise au point en 1895 par Carl von Linde pour la séparation des mélanges gazeux. Il permet de liquéfier les mélanges gazeux comme l'air ainsi que les gaz atmosphériques tels l'oxygène, l'azote et l'argon (un gaz rare) en quantités industrielles. Il peut ainsi servir en réfrigération pour les températures comprises entre 77 et 100 K

III-2- Historique :

Quoi qu'elle ne fût développée initialement qu'à des fins académique [13][14], cette technique, brevetée simultanément (en 1895) par l'ingénieur allemand Linde et l'avocat anglais William Hampson (1854-1926), trouva sa première application industrielle importante dès 1902 comme étape-clef de l'usine d'extraction d'oxygène (LZA) aménagée par Carl von Linde [15]. Ce type de réacteur est toujours utilisé pour l'obtention d'oxygène liquide ou gazeux, d'azote liquide et de gaz rare ; pour les applications proprement cryogéniques, en revanche, le procédé Linde primitif n'est plus employé, car les turbo détendeurs, constitutifs du procédé Claude, sont plus efficaces: ces machines n'exploitent pas l'effet Joule-Thomson, mais assurent un abaissement de température le plus adiabatique possible en absorbant l'énergie cinétique du gaz en phase d'expansion. Dans le procédé Linde primitif, c'est-à-dire dans l'expansion isenthalpique à travers une tuyère, au contraire, non seulement cette énergie n'est pas utilisée, mais elle dégrade le rendement par frottement dans la paroi poreuse. C'est pourquoi avec l'hélium, par exemple, dont la température d'inversion est très basse (40 K soit -233 °C), il faut préalablement abaisser la température du gaz pour le liquéfier par le procédé Linde. Depuis 1970, les gaz atmosphériques sont liquéfiés en combinant le procédé Linde et le procédé Claude : une partie du gaz est détendu par le procédé Linde, cependant que la détente isentropique (procédé Claude) du reste du gaz fournit le travail mécanique utile à la compression de l'étage amont [16].

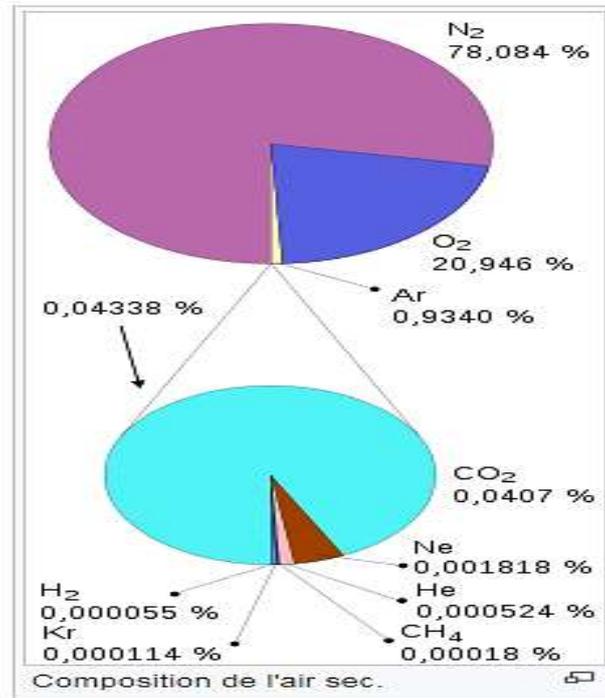


Figure III.1 composition de l'air sec

III-3- La Liquéfaction :

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

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

- 1) Cycle idéal de liquéfaction (Cycle de Linde),
- 2) Détente de Joule-Thomson (Joule-Kelvin),

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

- Transférer de la chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid via un échangeur de chaleur.
- Pomper sur un bain liquide en équilibre avec sa vapeur. Cela a pour effet d'abaisser la pression du fluide et donc la température en suivant la ligne de saturation gaz/liquide.
- Effectuer une détente isenthalpique, souvent appelée détente Joule Thomson ($\Delta H = 0$).

- Cela consiste à détendre le gaz à travers un orifice. Si cette détente s'effectue au-dessous de la température d'inversion, elle s'accompagne d'un refroidissement du gaz (la température d'inversion de l'hélium est d'environ 40K).
- Extraire de la chaleur via un travail extérieur sur une turbine ou un piston (transformation isentropique $\Delta S = 0$).

III-4- Cycle de Linde (Cycle idéal de liquéfaction) :

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

1-2 : Une compression réversible et isotherme du gaz de la température ambiante (**point 1**) à une haute pression (**point 2**) pour assurer que le gaz deviendra un liquide saturé,

2-f : Une détente réversible et isentropique jusqu'au **point f**. La pression finale au **point f** est égale à la pression au **point 1**

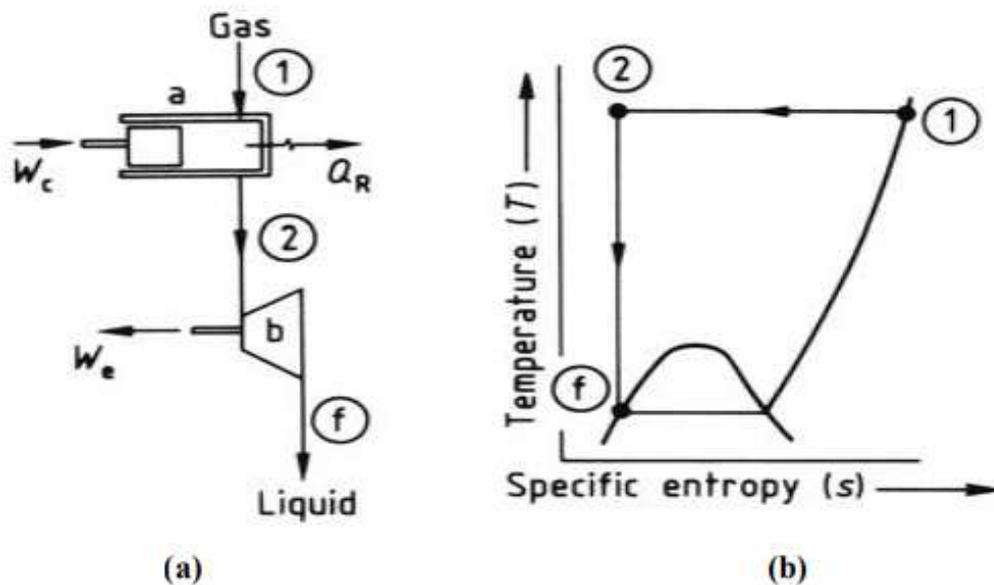


Fig. III-1 :Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz : (a) Représentation schématique

(b) Diagramme T-s

- ❖ Paramètres de performance pour le système de liquéfaction de gaz La performance des systèmes peut être quantifiée avec trois paramètres différents; ce sont :
 - Le travail requis pour liquéfier un gaz par rapport au débit de gaz comprimé : WC/qm

- Le travail requis par rapport au débit de gaz t liquéfiée : $-W_C/qmf$
- La fraction du débit total de gaz liquéfiée: $Y=qmf/qm$
 $-W_C/qm = Y (-W_C/qmf)$
- Figure of merit (FOM) : $FOM = W / W_{id} = (-W_C/qmf) = Y (-W_C/qmf)$

Dans le system idéal, la totalité du gaz comprimé est liquéfié, et que $qm = qmf$ ou $y=100\%$

Le travail théorique (mécanique) dépensé Le minimum travail théorique nécessaire pour liquéfier un gaz est exprimé par :

$$w_c / qmf = (s1 - sf) - (h1 - hf) \dots\dots\dots(1)$$

Avec :

- W_c / qmf le travail requis pour une unité de masse de gaz liquéfié en (KJ/kg) ;
- S1** l'entropie spécifique du gaz à l'entrée du cycle en (KJ/kg °k),
- Sf** l'entropie spécifique du gaz liquéfié à la sortie du cycle en (KJ/kg °k),
- H1** l'enthalpie spécifique du gaz à l'entrée du cycle en (KJ/kg),
- Hf** l'enthalpie spécifique du gaz liquéfié à la sortie du cycle en (KJ/kg),
- Qmf** le débit massique du gaz liquéfié à la sortie du cycle en (kg/s)

Efficacité du cycle :

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

$$\eta_{carnot} = T1 - Tf / T1 \dots\dots(2)$$

Où η_{carnot} l'efficacité du cycle Carnot en (%),

T1 la température absolue du gaz à l'état initiale (la température ambiante) en K .

Tf la température absolue du gaz à l'état finale (température de liquéfaction) en K .

III-5- Détente de Joule-Thomson (Joule-Kelvin) :

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

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

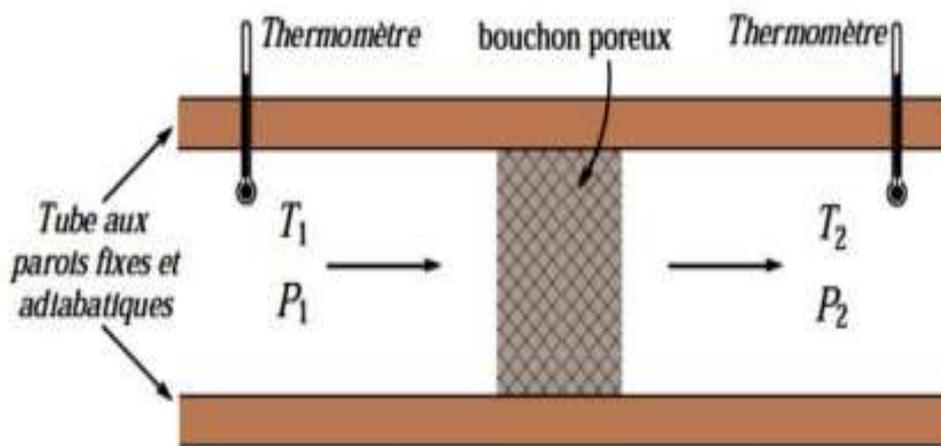


Figure .III-2 Expérience de Joule-Thomson

Description de l'expérience :

- Dans ce système, la membrane qui sépare les deux sections, une remplie de gaz et l'autre vide, est rompue pour laisser le gaz passer de la zone de haute pression à la zone de basse pression.
- Les parois du tuyau sont rigides et adiabatiques.
- La pression **P1** en amont du tampon est plus forte que la pression **P2** en aval (cette baisse de pression pouvant être comprise par l'existence de forces de frottements à la traversée du bouchon poreux provoquant un ralentissement du gaz et une diminution de pression).

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

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

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

Coefficient Joule-Thomson (J-T) :

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

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

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

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

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

Température d'inversion :

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

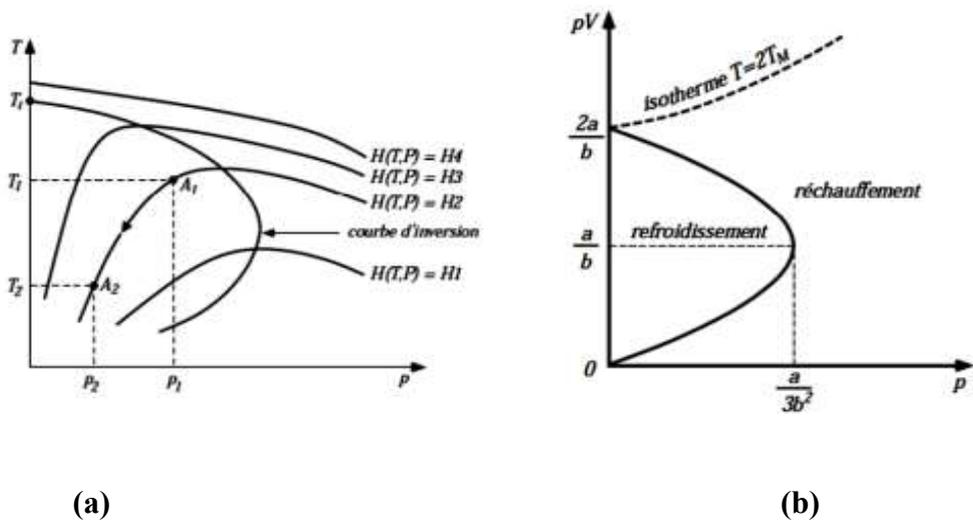


Fig. III- 3 (a) Diagramme T-P pour un gaz réel
 (b) Courbe d'inversion de la détente de Joule-Thomson

- Ainsi, pour une DJT 'élémentaire, lorsque $\mu_{JT} < 0$: la température du fluide augmente
 $\mu_{JT} = 0$: la température du fluide est constante
 $\mu_{JT} > 0$: la température du fluide diminue
- On observe que certaines des courbes isenthalpique passent par **un maximum**, c'est-à-dire un **point où la pente est nulle** :
 $\mu_{JT} = 0 \Rightarrow H = 0$ (6)
- La courbe en pointillé qui relie ces points maximaux est appelée la « **courbe d'inversion** » et la température en ces points, la « **température d'inversion** ».
- La température au point où la courbe d'inversion intercepte l'ordonnée ($P = 0$) est appelée la « **température d'inversion maximale** ».
- On remarque que le coefficient de Joule-Thomson (la pente d'une courbe isenthalpique) est négatif à droite de la courbe d'inversion ($\mu_{JT} < 0$) et positif à gauche ($\mu_{JT} > 0$).
- Une détente isenthalpique se produit lorsqu'elle parcourt une courbe isenthalpique dans un diagramme (T, P) de la droite vers la gauche. Par conséquent, la température du fluide augmente durant une détente qui se produit du côté droit de la courbe d'inversion. La température du fluide diminue durant une détente qui se produit du côté gauche de la courbe d'inversion.
- L'effet de refroidissement ne peut donc être réalisé à moins que la température du fluide soit inférieure à la température d'inversion maximale.

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

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

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

III .6 .Conclusion

Ce **chapitre** est destiné sur historique de procédé **Linde** de liquéfaction des gaz, et la liquéfaction en générale, ainsi que la détente de Joule-Thomson (Joule-Kelvin).

Chapitre IV:

**Etude Thermodynamique
D'un Cycle De Linde A Deux
Compresseur Et Doubles Et
Détentes**

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A Deux Compresseur Et Doubles Détentes

IV.1 Rappel thermodynamique :

IV.1.1 Premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert :

La variation d'énergie totale d'un système ouvert résulte des échanges d'énergies avec le milieu extérieur.

$$\Delta E_T = \Delta U + \Delta E_C + \Delta E_P = Q + W = \sum_i U_i - \sum_j U_j + \sum_i \frac{1}{2} m_i C_i^2 - \sum_j \frac{1}{2} m_j C_j^2 + \sum_i m_i g z_i - \sum_j m_j g z_j$$

- Energie interne : $\Delta U_{ij} = \sum U_i - \sum U_j$.
- Energie cinétique : $\Delta E_{Cij} = \frac{1}{2} m_i C_i^2 - \frac{1}{2} m_j C_j^2$.
- Energie potentielle : $\Delta E_{Pij} = m_i g z_i - m_j g z_j$

Si on introduit l'enthalpie :

$$H = U + P V$$

$$\Delta E_T = Q + W = \sum_i H_i - \sum_j H_j + \sum_i \frac{1}{2} m_i C_i^2 - \sum_j \frac{1}{2} m_j C_j^2 + \sum_i m_i g z_i - \sum_j m_j g z_j$$

De plus si on note par T l'enthalpie totale par unité de masse

$$T = H + C^2 + g z_j$$

$$\Delta E_T = Q + W = \sum_i m_i T_i - \sum_j m_j T_j$$

- ΔE_T : énergie totale échangée avec le milieu extérieur.
- Q : Puissance thermique échangée avec le milieu extérieur.
- W : Le travail fourni ou reçu par le système.
- m_i, m_j : Débit massique de fluide.

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A

Deux Compresseur Et Doubles Détentes

IV.1.2 Bilan énergétique :

Le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée :

La loi générale de la thermodynamique du gaz :

$$0 - W_{net} = \sum_{sortie} m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{entrée} m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)$$

- Q_{net} : La quantité de chaleur transférée du / au système.
- W_{net} : Le travail net fourni ou absorbé par le système.
- h : L'enthalpie.
- gz : L'énergie potentielle.
- $\frac{v^2}{2}$: L'énergie cinétique.

Hypothèse :

$$\frac{v^2}{2} \text{ et } gz \ll h$$

$$Q_{net} - W_{net} = \sum m_s h_s - \sum m_e h_e$$

D'après la 1ère loi de la thermodynamique :

- $Q_R = m T (S_2 - S_1)$.
- $Q_R - W_i = m (h_f - h_1)$.

Puisque dans le cycle de Carnot le transfert de chaleur est réversible et isothermique et que le processus de point 2 au point f est isentropique : $S_2 = S_f$

Donc le travail nécessaire pour le système idéal :

$$\frac{W_i}{m} = T_1 (S_1 - S_f) - (h_1 - h_f) = \frac{W_i}{m_f}$$

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

$$Y = 1 \text{ et } m = m_f$$

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A Deux Compresseur Et Doubles Détentes

IV.2 Cycle de Linde à 2 compresseurs :

Motivation :

Toujours une petite proportion de gaz est liquéfiée : quel que soit la quantité de gaz comprimé, une seule petite fraction de ce gaz est liquéfiée.

Le travail de compression est proportionnellement au logarithme de taux de compression :

$$W = R T \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Si nous pouvons réduire ce taux de compression, alors nous serons en mesure de réduire l'exigence de travail, mais, en même temps, la liquéfaction sera également réduite. Maintenant, il faut voir si la réduction de l'exigence de travail peut compenser la réduction de la liquéfaction.

IV.2.1 Principe de fonctionnement :

Le gaz est d'abord comprimé à une pression intermédiaire, puis à la haute pression d'après l'ajoutant d'un courant de retour m_i . le gaz à haut pression passe

par un échangeur à trois flux. Détendu dans la première vanne jusqu'à la pression ou une partie du gaz est liquéfié. Le liquide saturé et la vapeur sont séparés. La vapeur est renvoyée au deuxième compresseur à travers l'échangeur et le reste est subit à une 2^{em} détente $Y = 1$ et $m = m_f$

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A

Deux Compresseur Et Doubles Détentes

.IV.2.2. Schéma de cycle de Linde à deux compresseurs et leur diagramme T-S :

Nous avons fait le schéma de fonctionnement PFD (process flow diagramme) de ce cycle par logiciel de simulation 'HYSYS'

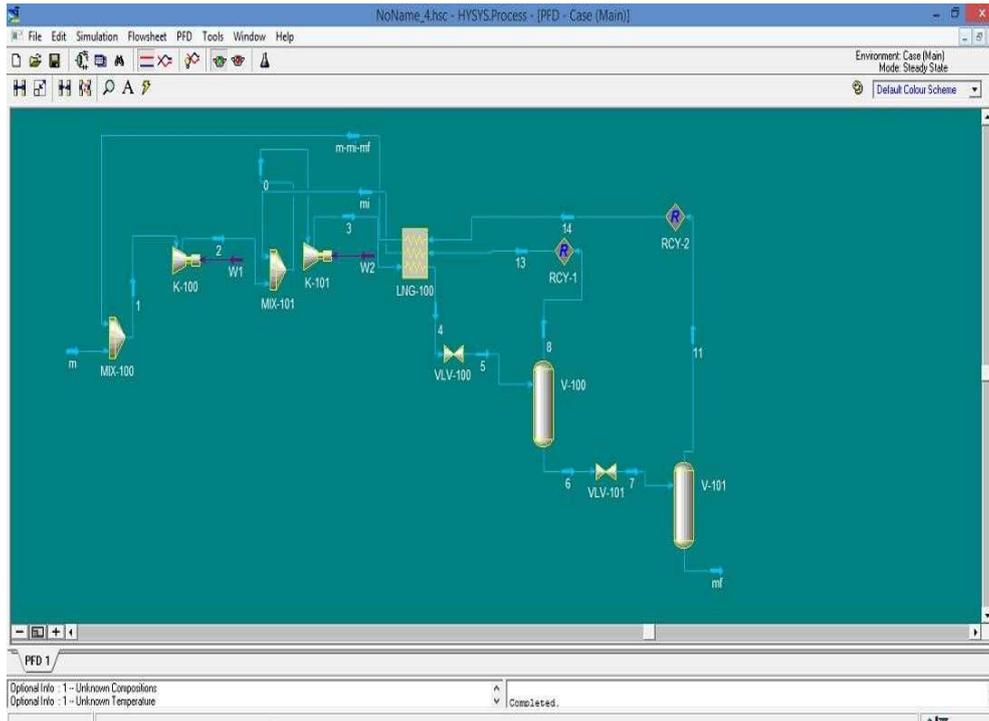


Figure IV.2 Schéma et principe de fonction pour le cycle de Linde

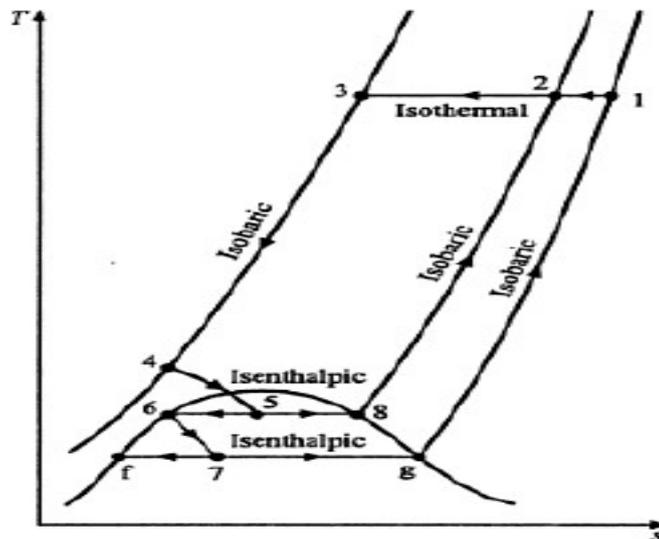


Figure IV.3 Diagramme T-S pour le cycle de Linde

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A Deux Compresseur Et Doubles Détentes

1. Une masse (m) est comprimée de 1 à 3 par deux compresseurs à basse pression et haute pression de manière isotherme, avec $T_1=T_2=T_3$.

2. La même masse (m) passe de 3 à 4 via un échangeur à pression constante, avec $P_3=P_4$.

3. Ensuite, le gaz se détend de 4 à 5 par une détente de Joule-Thomson, atteignant le point 5 (détente isenthalpique), avec $H_4=H_5$.

4. Par la suite, il s'échappe de 5 à 8 de manière isotherme et ensuite, à travers l'échangeur, il prend la forme d'une masse m_i jusqu'au point 2 à pression constante, avec $P_8=P_2$.

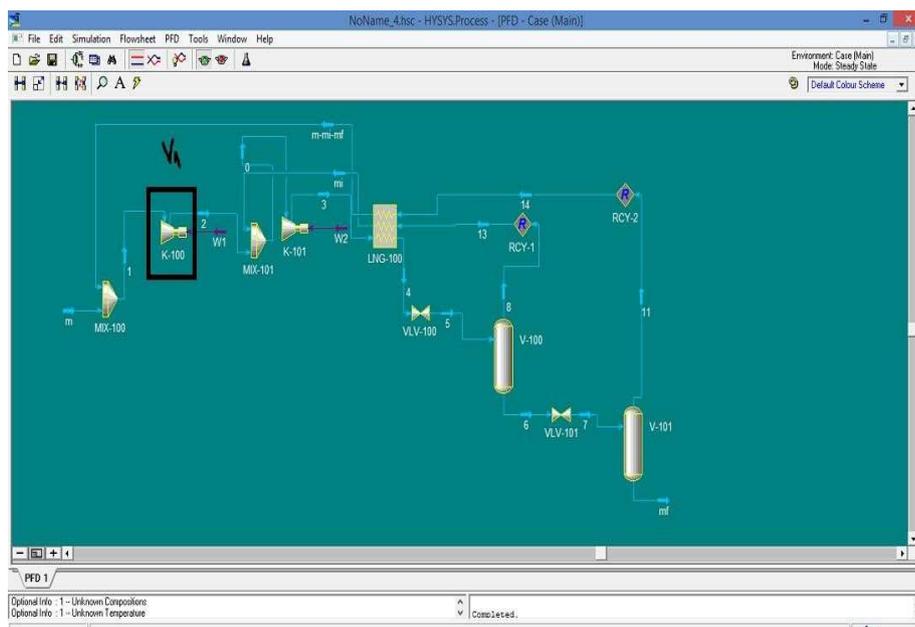
5. De l'autre côté, du point 5 au point 6 il passe à travers un réservoir sous forme liquide à température constante, avec $T_5=T_6$.

6. Ensuite, il se détend de 6 à 7 par une détente de Joule-Thomson jusqu'au point 7 (détente isenthalpique), avec $H_6=H_7$.

7. En fin de compte, le fluide passe par point 7 à f sous forme liquide (mf), tandis que de l'autre côté, du point 7 à g le gaz s'exfiltre à travers l'échangeur dont la masse est ($m - mf - m_i$) et avec une pression constante au point g , jusqu'au point 1.

IV.3. Les performances et les paramètres à calculer :

a/ travail requis par unité de masse pour le premier compresseur :



Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A Deux Compresseur Et Doubles Détentes

On appliquant la 1ère loi de la thermodynamique sur le volume de contrôle V1 le premier compresseur :

$$O_{R1} - W_{C1} = \sum_i m_i (h_T) - \sum_j m_j (h_T) O_{R1} -$$

$$W_{C1} = (m - m_i) h_1 - (m - m_i) h_2 \quad W_{C1} = (m - m_i) (h_2 - h_1) + O_{R1}$$

D'après le deuxième principe de la thermodynamique : $dS = \frac{\delta Q}{T}$
 $O_{R1} = (m - m_i) T_1 (s_2 - s_1)$.

Donc :

Pour le 2em compresseur :

$$W_{C1} = (m - m_i) (T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2))$$

$$W_{C1} = m (T_1 (s_1 - s_3) - (h_1 - h_3))$$

La somme des travaux des deux compresseurs :

On met : $i = \frac{m_i}{m}$ Représente la fraction de gaz de retour qui passe par

L'échangeur et on divise le tout par m :

$$W_{C1} + W_{C2} = W_C$$

$$\frac{W_C}{m} = T_1 (s_1 - s_3) - (h_1 - h_3) - i (T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2))$$

b/La fraction de gaz liquide :

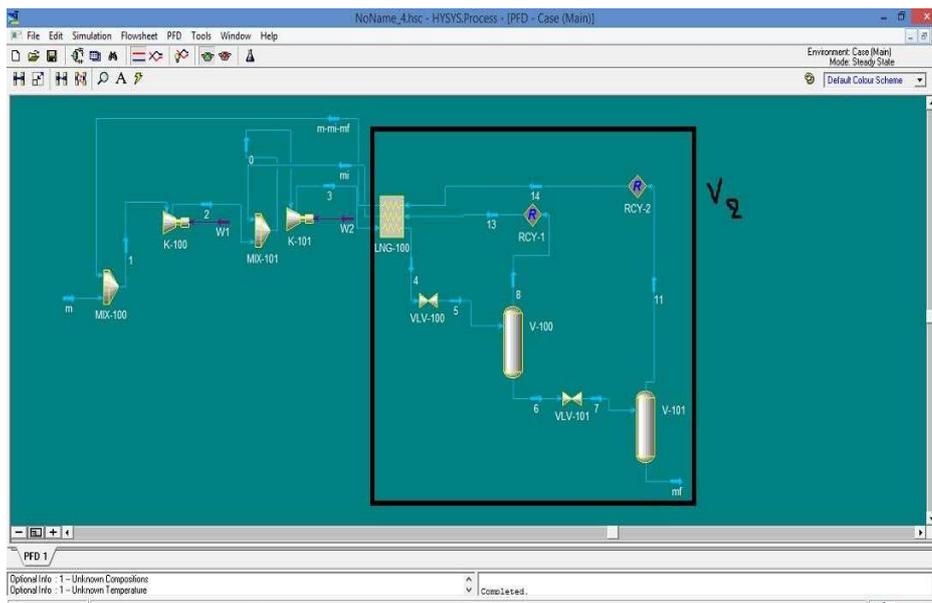


Figure IV.5 : volume de contrôle V2

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A Deux Compresseur Et Doubles Détentes

On applique la 1^{ère} loi de la thermodynamique sur le volume de contrôle V2 :

$$Q + W_t + \sum_i m_i (h_T) - \sum_j m_j (h_T)$$

$Q = 0.$

- $W=0$ il n'y a pas un travail fournir au système.

$$m_i h_3 = m_i h_2 + (m - m_i - m_f) h_1 + m_f h_f.$$

$$m_i (h_3 - h_1) = m_i ((h_2 - h_1) + m_f (h_f - h_1))$$

On devise par m :

$$m_f$$

$$\frac{m_f}{m} (h_f - h_1) = (h_3 - h_1) - i (h_2 - h_1)$$

On met : $\frac{m_f}{m} = y$

Donc :

$$y = \frac{(h_1 - h_3)}{(h_f - h_1)} - i \frac{(h_1 - h_2)}{(h_f - h_1)}$$

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A Deux Compresseur Et Doubles Détentes

c/Le travail nécessaire par l'unité de masse du gaz liquéfiée :

La formule générale est donnée par :

$$\frac{W_C}{m_f} = \frac{W_C}{m} * \frac{1}{y}$$

-

$$\frac{W_C}{m_f} = \frac{(T1 (s1-s3) - (h1-h3) - i (T1 (s1-s2) - (h1-h2)))}{\frac{(h1-h3)}{(h_f-h1)} - i \frac{(h1-h2)}{(h_f-h1)}}$$

d/FOM : (figure of merit) : Représente le rendement thermodynamique

Il est donné par la formule :

$$\text{FOM} = \frac{\frac{W_i}{m}}{\frac{W_C}{m_f}}$$

IV.4. Paramètres d'opération d'un système de liquéfaction :

Pour l'investigation de cycle de Linde pour la liquéfaction de gaz, trois paramètres d'opération ont été considérés pour minimiser le travail et augmenter la quantité liquéfiée :

- 1) La pression intermédiaire P2(atm).
- 2) Le rapport massique (i=mi/m).
- 3) La variation de FOM en fonction de Y.

IV.5. Les Paramètres calculé sont :

- Le travail requis par unité de masse : $\frac{W_C}{m}$.
- Le travail idéal : $\frac{W_i}{m}$.
- La fraction de gaz liquide : y.

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A

Deux Compresseur Et Doubles Détentes

- Le travail nécessaire par l'unité de masse du gaz liquéfiée : $\frac{W_c}{m_f}$

- FOM coefficient de mérite.

Les paramètres connus (donnés) :

Quelques paramètres sont donnés par l'utilisateur tels que : Les paramètres à l'entrée du compresseur :

- La pression : 1atm.
- La pression finale sortie de 2em compresseur : 200 atm.

Les paramètres tirés à partir des diagrammes et de logiciel de « refprop » :

Pour trouver les valeurs précises de l'entropie et de l'enthalpie, nous utilisons le logiciel "Refprop". Nous fournissons les valeurs de température et de pression pour chaque fluide, et le logiciel nous donne les autres propriétés du fluide (S, H). Voir les annexes 1,2,3 des diagrammes T-S relatifs aux fluides étudiés.

Azote :

Point	P (atm)	T (K°)	H (J/g)	S (J/g.K°)
1	1	294	304.95	6.8207
2	5	294	304.01	6.3401
3	200	294	271	5.1316
F	1	77.3	-122.77	2.8248

Tableau IV.1 : les paramètres P, T, S, H de azote aux chaque points du cycle pour une pression intermédiaire 5atm

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A

Deux Compresseur Et Doubles Et Détentes

Pour les autres pressions intermédiaires :

P(2)	H	S
20	300.59	5.9179
40	296.19	5.6982
60	292.03	5.5644
80	288.13	5.4661
100	284.51	5.3876
120	281.19	5.3220
140	278.18	5.2654
160	275.48	5.2157
180	273.09	5.1714
200	271.00	5.1316

Tableau IV.2 : les paramètres S, H de azote aux chaque points du cycle pour différents pression intermédiaire

2. méthane :

Point	P(atm)	T(k°)	H (J/g)	S (J/g.K°)
1	1	294	900.71	6.6432
2	5	294	896.64	5.7991
3	200	294	712.67	3.4138
F	1	111	-70.645	-0.69919

Tableau IV.3 : les paramètres P, T, S, H de méthane aux chaque points du cycle pour Une pression intermédiaire 5atm

Pour les autres pressions intermédiaires :

P(atm)	H(j/g)	S(j/g.k°)
20	881.15	5.0422
40	860.01	4.6298
60	838.47	4.3647
80	816.83	4.1597
100	795.56	3.9886
120	775.22	3.8409
140	756.42	3.7118
160	739.60	3.5988
180	725.01	3.5000
200	712.67	3.4138

Tableau IV.4 : les paramètres S, H de méthane aux chaque points du cycle pour différentspression intermédiaire

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A

Deux Compresseur Et Doubles Et Détentes

1. Oxygène :

Point	P(atm)	T(k°)	H(j/g)	S(j/g*k°)
1	1	294	267.19	6.3943
2	5	294	266.17	5.9733
3	200	294	222.09	4.8909
F	1	91	80.473	5.3129

Tableau IV.5 : les paramètres P, T, S, H de O2 aux chaque points du cycle pour une pressionintermédiaire 5atm

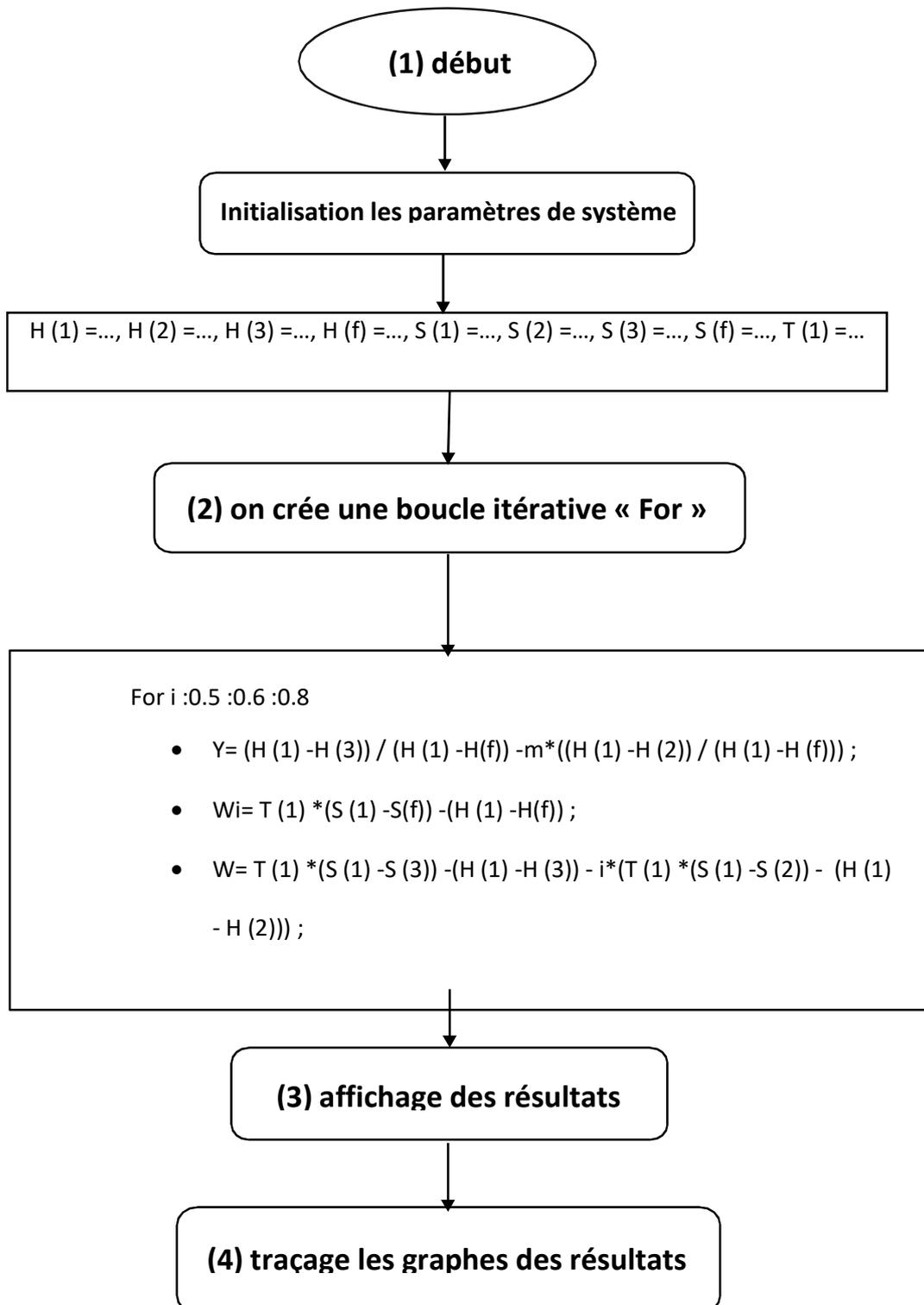
Pour les autres pressions intermédiaires :

P(atm)	H(j/g)	S(j/g.k°)
20	262.32	5.6027
40	257.23	5.4086
60	252.21	5.2895
80	247.30	5.2011
100	242.54	5.1298
120	237.96	5.0695
140	233.60	5.0170
160	229.49	4.9705
180	225.64	4.9278
200	222.09	4.8909

Tableau IV.4 : les paramètres S, H de O2 aux chaque points du cycle pour différents pression intermédiaire

Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A Deux Compresseur Et Doubles Et Détentes

D'après les relations thermodynamiques, nous procédons au calcul numérique sous 'MATLAB'



Chapitre IV: Etude Thermodynamique D'un Cycle De Linde A Deux Compresseur Et Doubles Et Détentes

Conclusion :

Ce chapitre est destiné aux rappel thermodynamique (système ouverts) ainsi que calculés des différents paramètres du cycle en utilisant le "rafprop "et le logiciel "MATlab "

Chapitre V :

Résultats et affichage

V.1. Influence de la pression intermédiaire sur les performances du cycle avec (I) différents :

L'affichage des résultats est représenté dans les figures :

V.1.a. L'effet sur le travail requis par unité de masse (W/m):

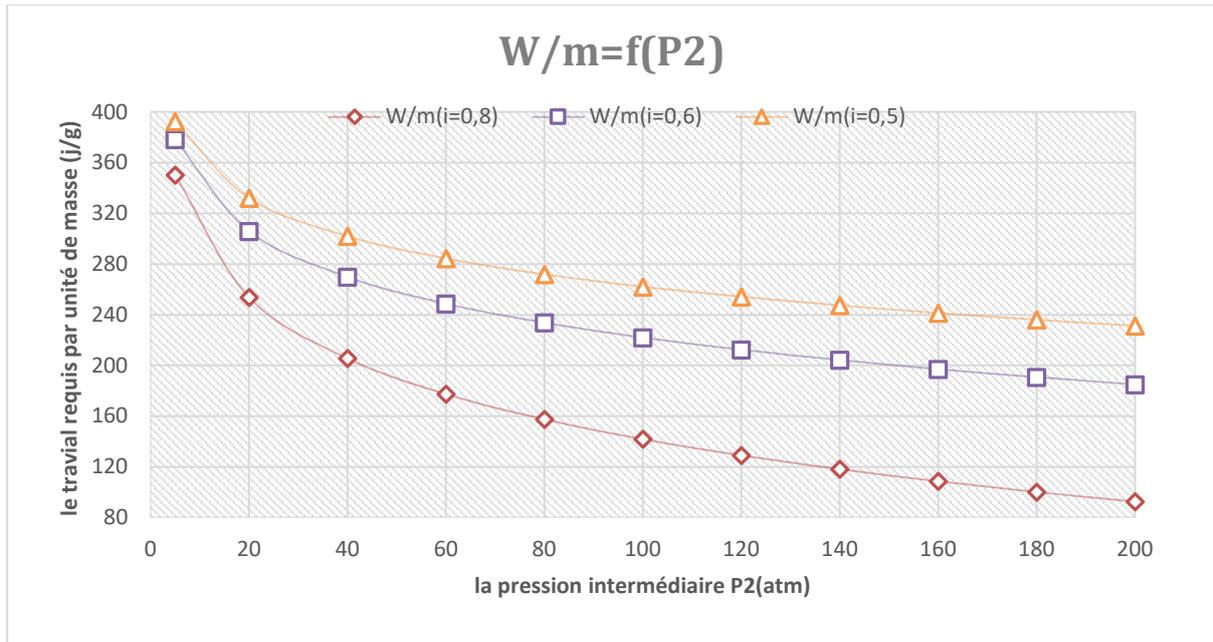


Figure V.1 : Diagramme du travail requis par unité de masse en fonction de pression intermédiaire pour l'azote

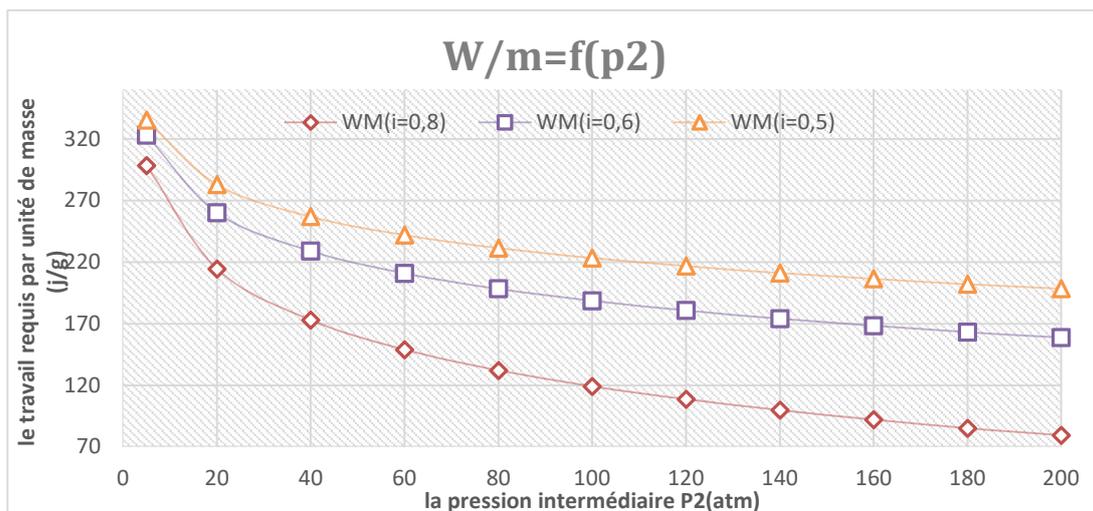


Figure V.2: Diagramme du travail requis par unité de masse en fonction de pression intermédiaire pour l'Oxygène

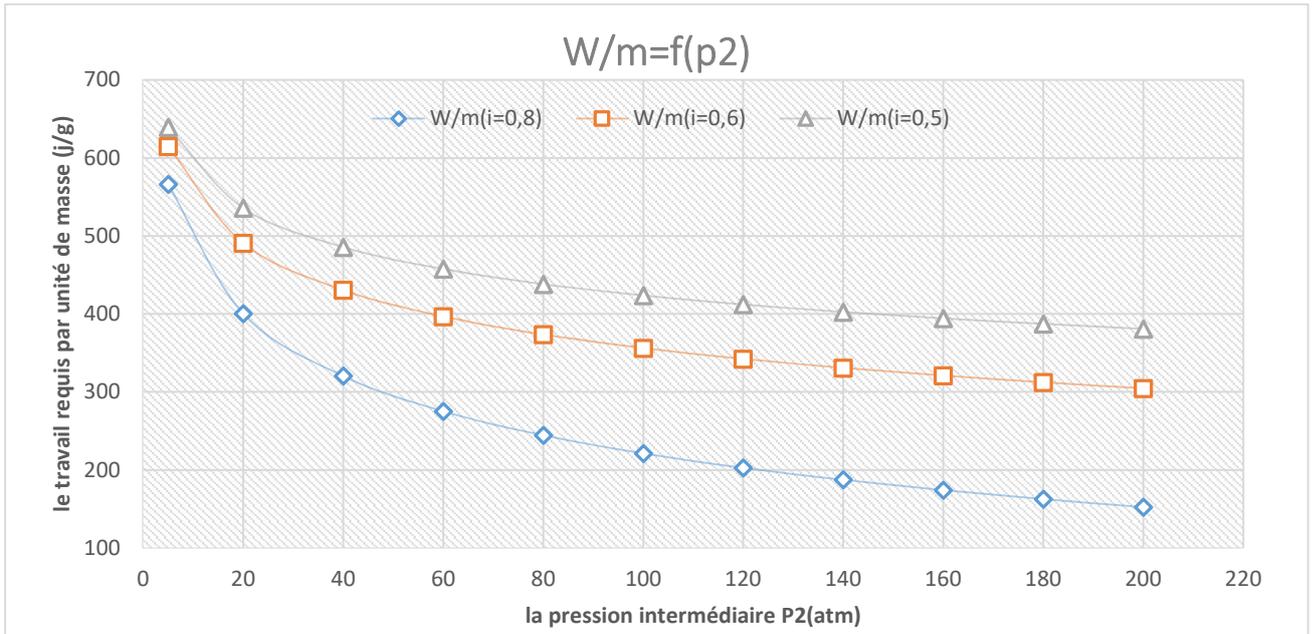


Figure V. 3 : Diagramme du travail requis par unité de masse en fonction de pression intermédiaire pour Méthane

Interprétation des résultats :

On remarque que pour une valeur donnée du rapport massique i , le travail W/m du système diminue avec l'augmentation de la pression intermédiaire.

Plus le rapport massique i augmente, plus le W/m diminue, et que la pente de W/m est plus raide au début puis va être diminuée.

V.2.b. L'effet sur La fraction de liquide (Y):

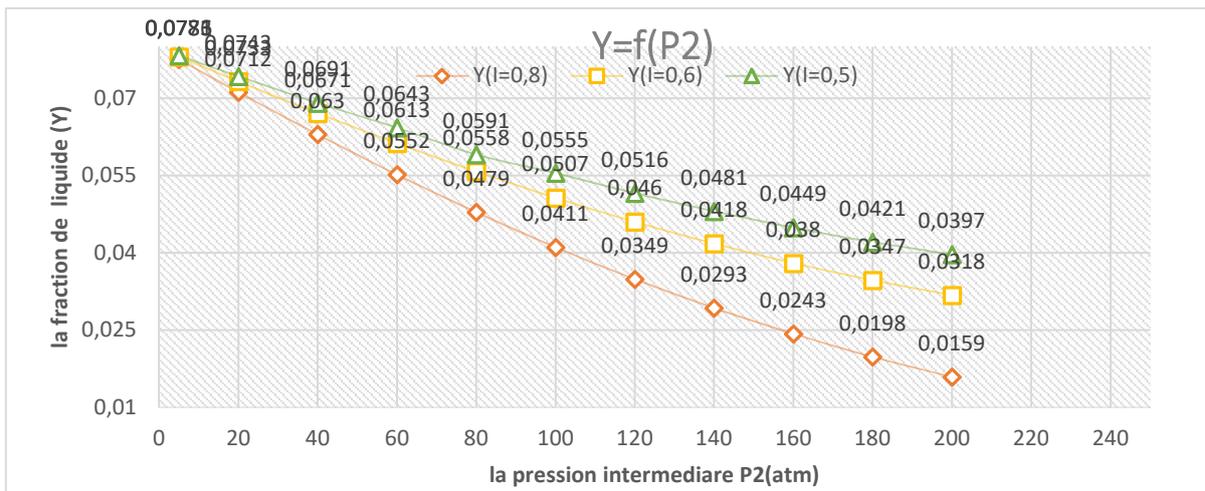


Figure : V.4 : Diagramme de La fraction de liquide en fonction de la pression intermédiaire pour l'azote

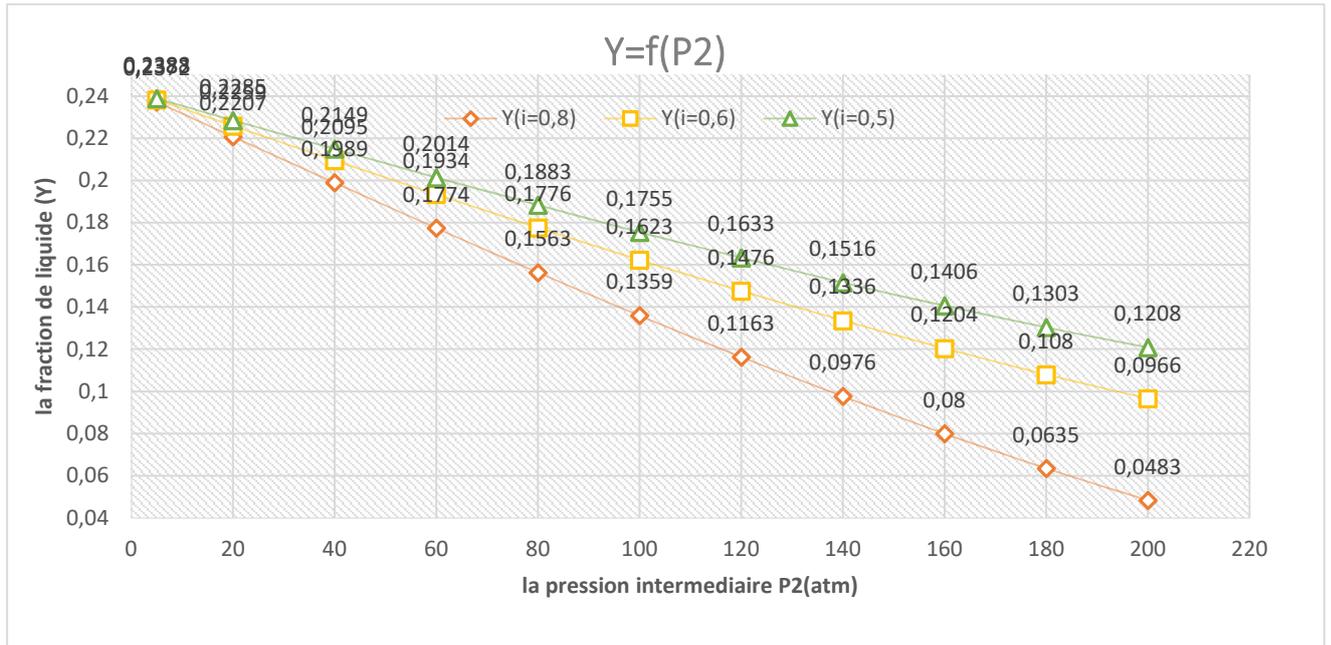


Figure : V.5: Diagramme de La fraction de liquide en fonction de la pressionintermédiaire

Pour l'Oxygène

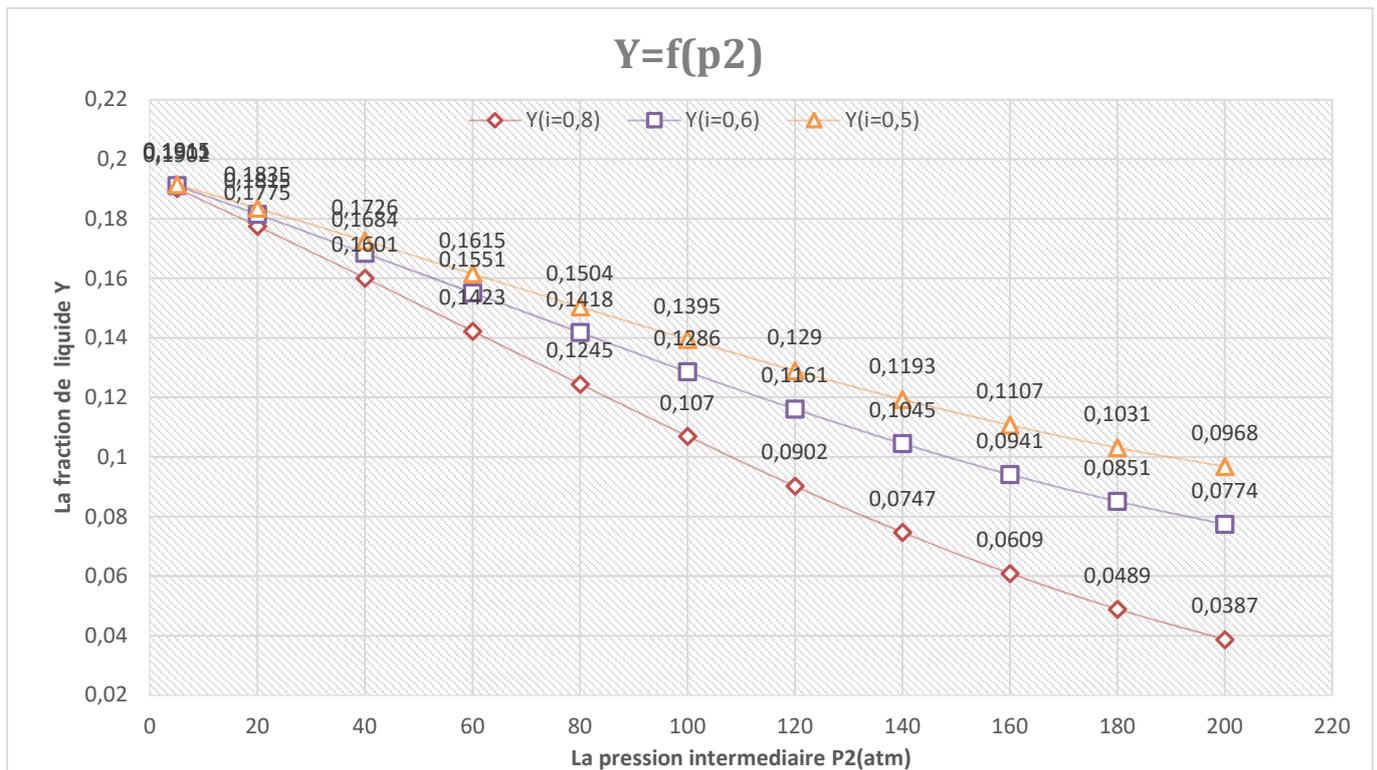


Figure V.6 : Diagramme de fraction de liquide en fonction de la pressionintermédiaire

Pour Méthane

Interprétation des résultats :

On remarque que : pour un i donné lorsque la pression intermédiaire augmente, la fraction du liquide va diminuer presque linéairement et la fraction de liquide diminue lorsque le i augment à une pression donnée.

V.2.c. L'effet sur Le travail de masse liquéfiée (W/mf) et le coefficient de mérite (FOM):

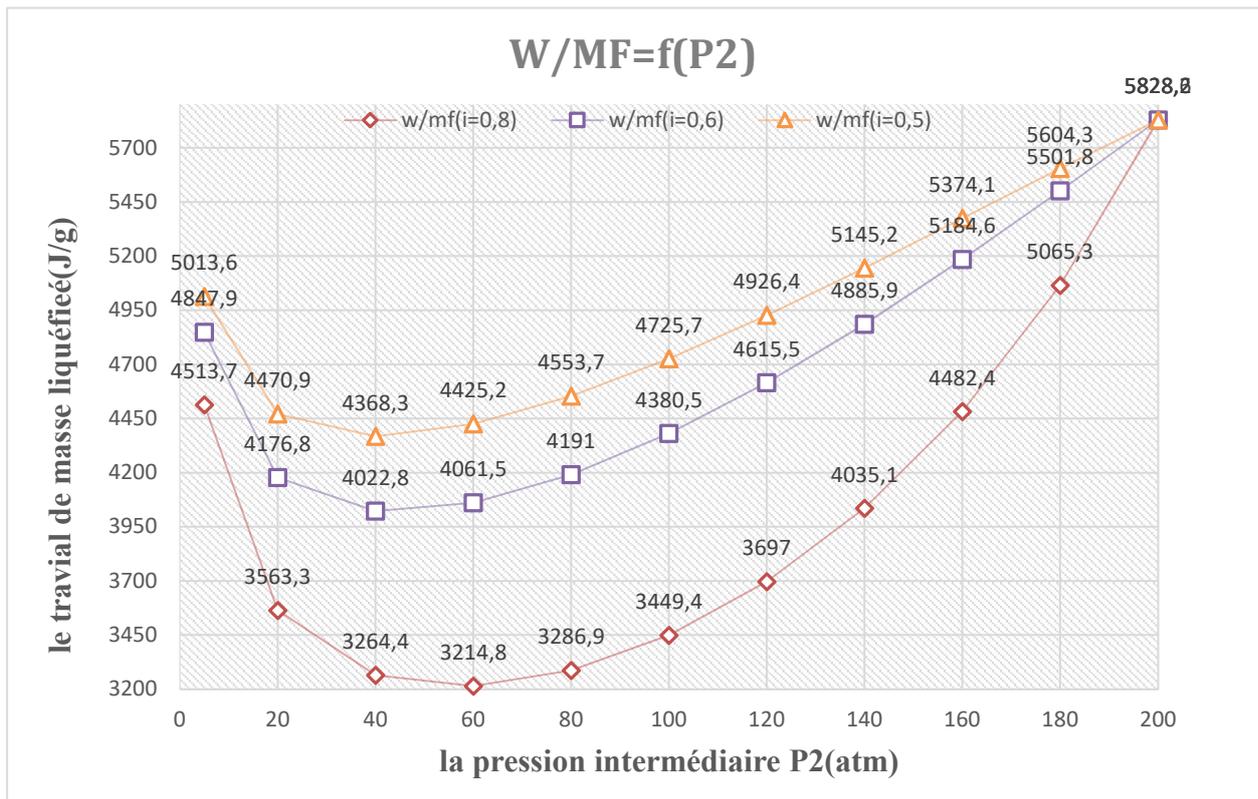


Figure V.7 : Diagramme du travail de masse liquéfiée en fonction de pression intermédiaire Pour l'azote

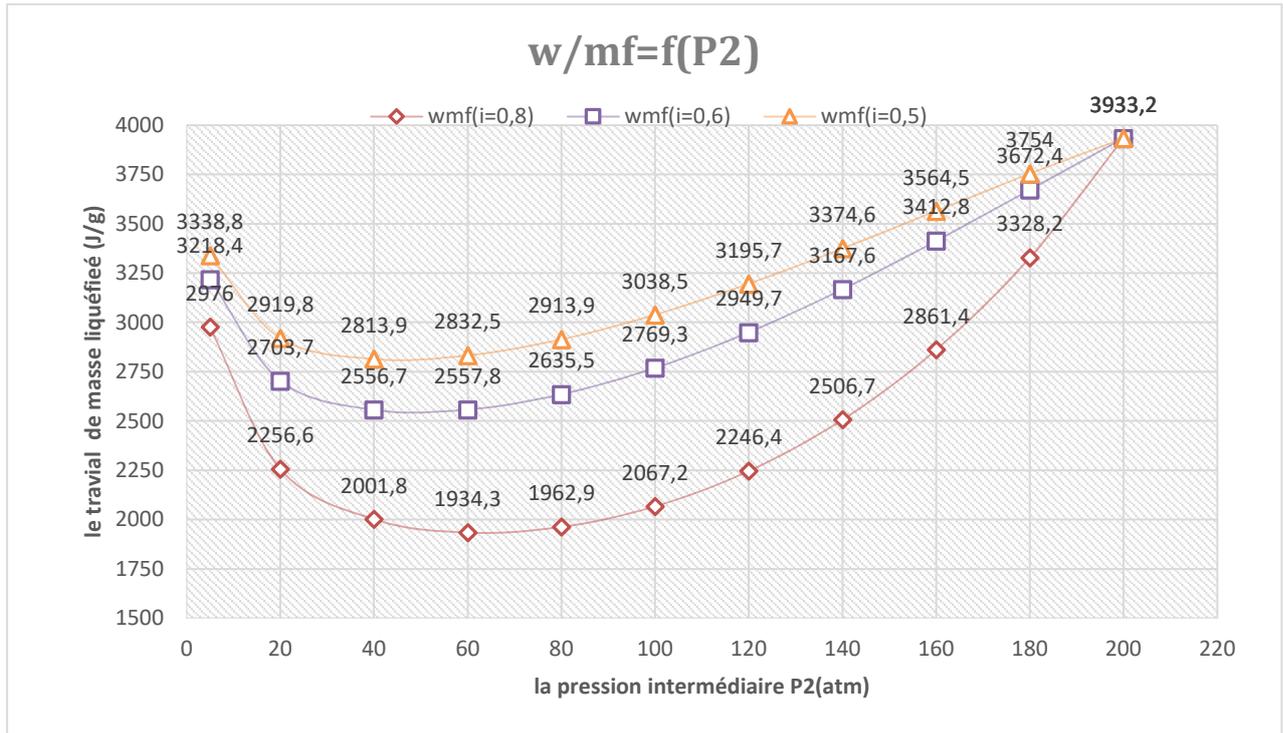


Figure V.8 : Diagramme du travail de masse liquéfiée en fonction de pression intermédiaire
Pour Méthane

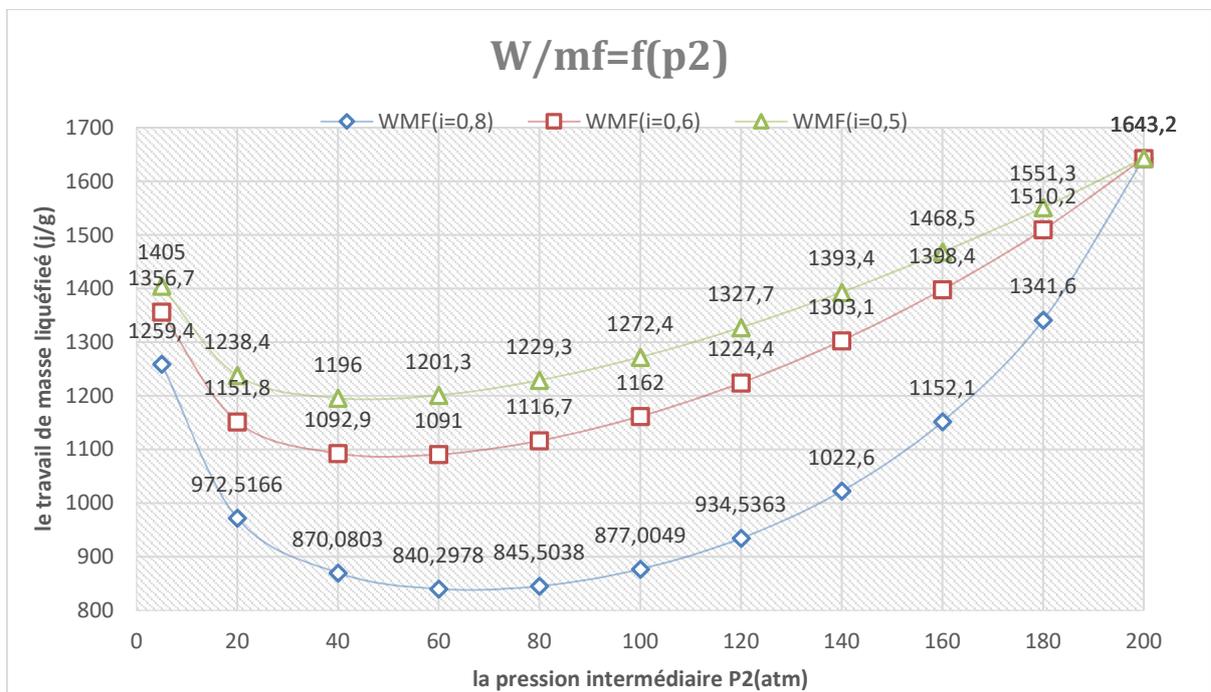


Figure V.9 : Diagramme du travail de masse liquéfiée en fonction de pression intermédiaire
Pour l'oxygène

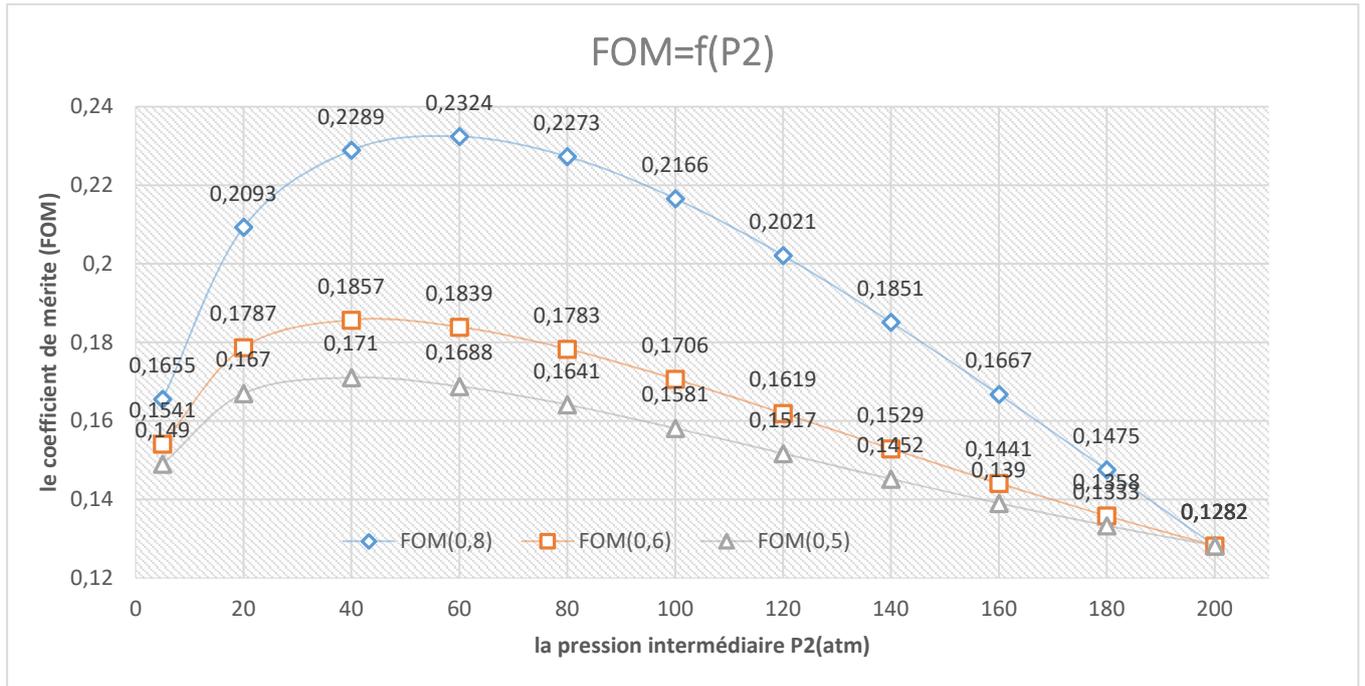


Figure V.10 : Diagramme de FOM en fonction de pression intermédiaire pour l'azote

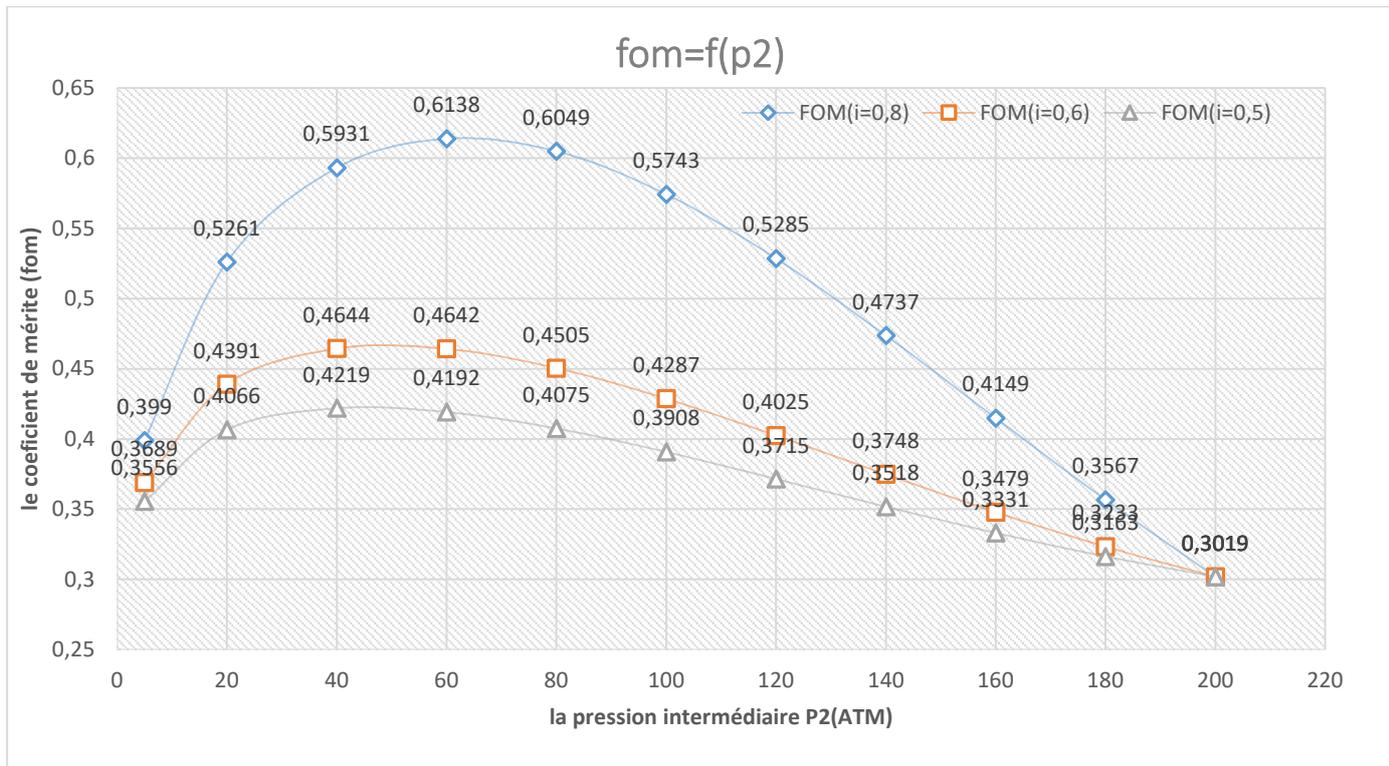


Figure V.11: Diagramme de FOM en fonction de pression intermédiaire pour méthane

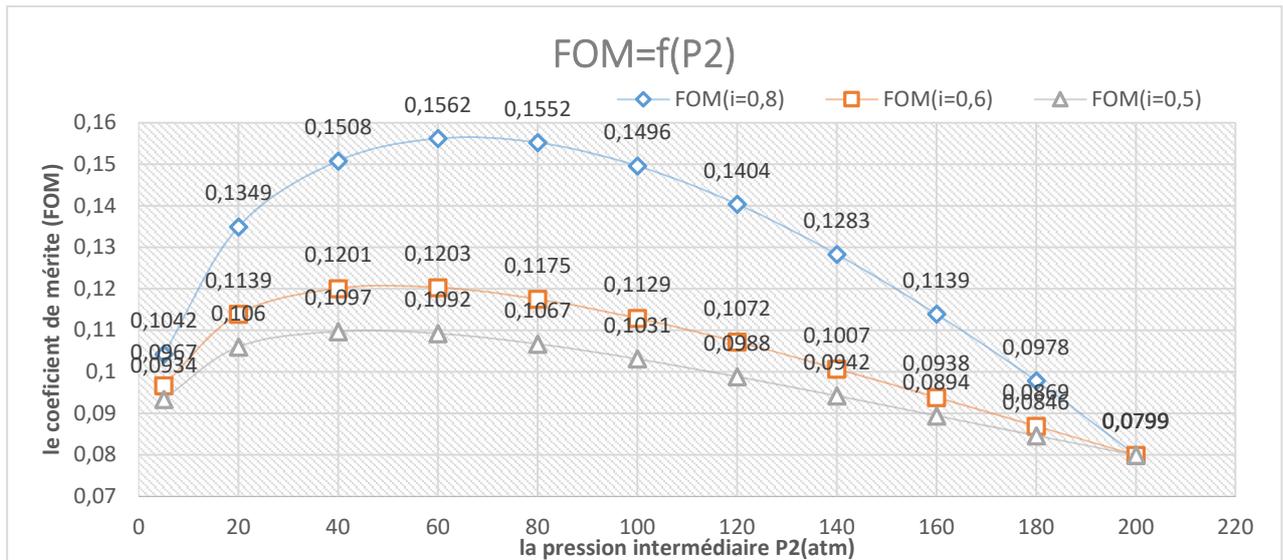


Figure V.12: Diagramme de FOM en fonction de pression intermédiaire pour L'oxygène

Interprétation des résultats :

On observe que le travail par unité de masse liquéfié (W/mf) passe par un minimum lorsque la pression intermédiaire augmente et la valeur minimale correspond à une pression intermédiaire égale 60atm et passe par un maximum lorsque la pression P2 dépasser la valeur minimale jusqu'à $p=200atm$. Par contre le FOM passe par un maximum lorsque la pression intermédiaire augmente et la valeur maximale correspond la même pression intermédiaire et passe par un minimum lorsque la pression P2 dépasser la valeur $P2=60atm$ jusqu'à $p=200atm$.

V.2. Influence de rapport massique ($i=mi/m$) sur les performances du cycle à $p=60(atm)$:

V.2.a. L'effet sur La fraction de gaz liquide (Y):

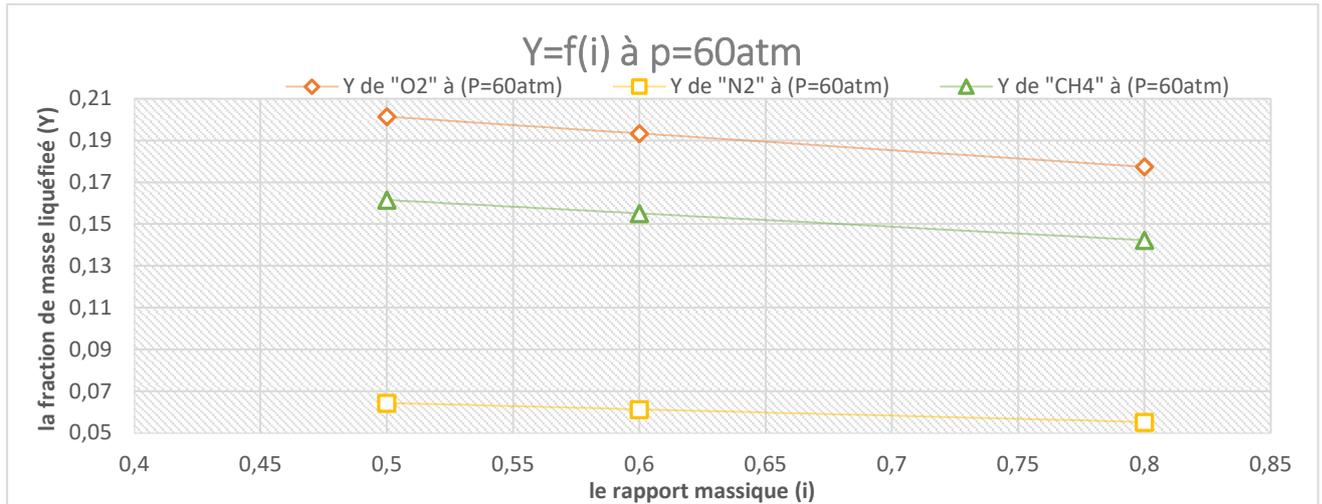


Figure V.13: Diagramme de(Y) en fonction de rapport massique(i) avec p=cst

Interprétation des résultats :

On observe que Lorsque le rapport de débit massique (i) augmente, la fraction de masse liquéfiée diminue légèrement à une pression intermédiaire donnée. et toujours la fraction de masse liquéfiée diminue lorsque le i augmente.

V.2.b. L'effet sur le travail requis par unité de masse (W/m):

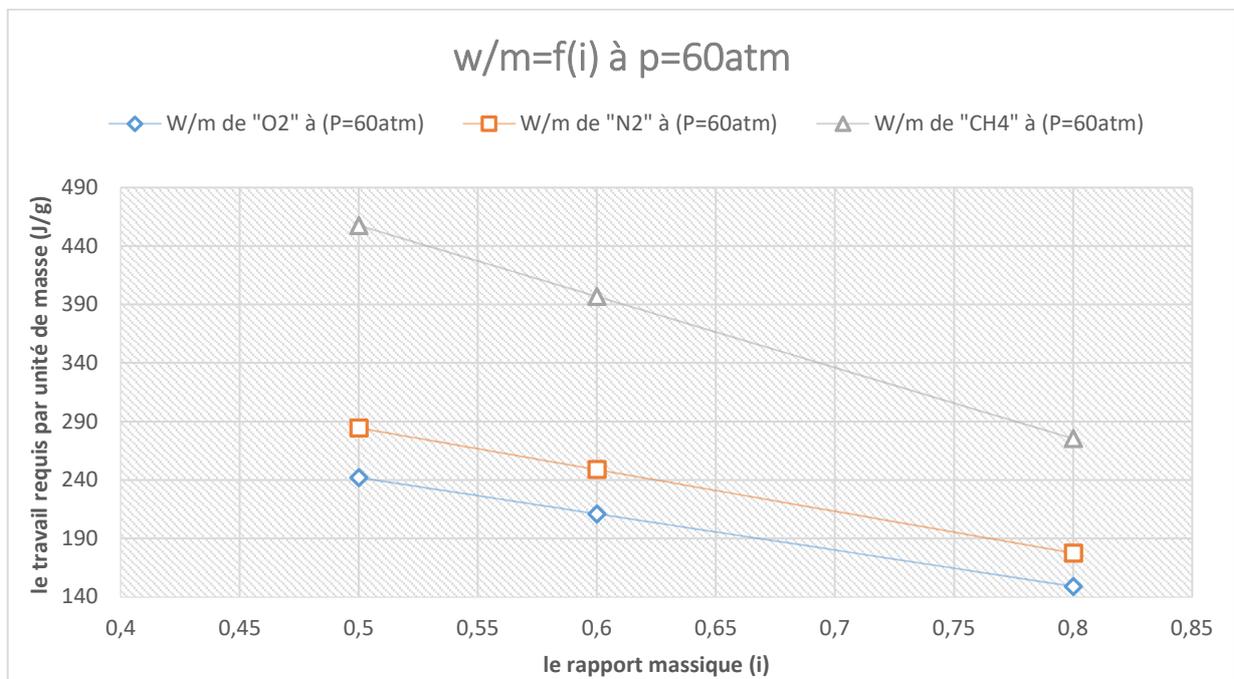


Figure V.14: Diagramme de W/m en fonction de rapport massique(i) avec p=cst

Interprétation des résultats :

On remarque que le travail de compression (w/m) diminue linéairement lorsque le rapport de débit massique augmente pour tous les gaz (N2, O2, CH4) à pression intermédiaire (p2) donné.

V.2.c. L'effet sur Le travail de masse liquéfiée (W/mf) :

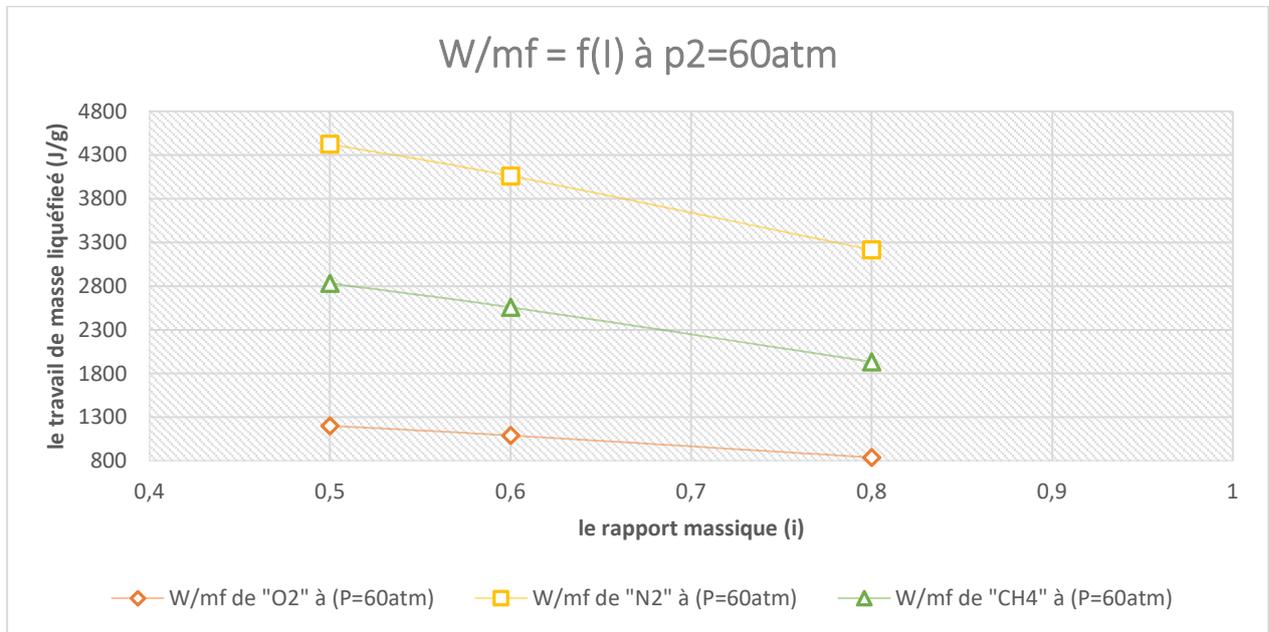


Figure V.15: Diagramme de W/mf en fonction de rapport massique(i) avec p=cst

Interprétation des résultats :

Et la même chose pour (W/mf) , On remarque que le travail (W/mf) du système diminue avec l'augmentation de le rapport de débit massique (I) pour chaque gaz, Plus le rapport massique **i** augmente, plus le W/m diminue.

V.2.d. L'effet sur coefficient de mérite (FOM) :

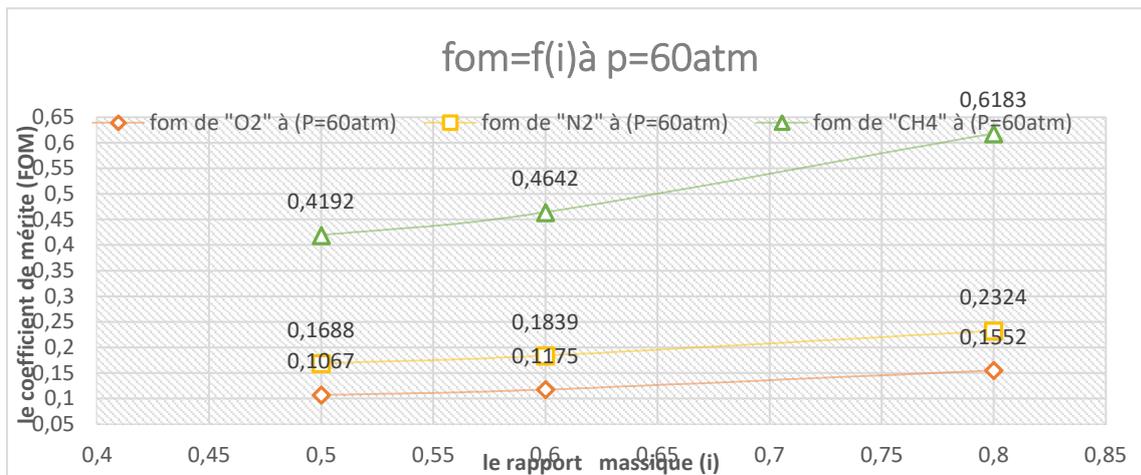


Figure V.16: Diagramme de FOM en fonction de rapport massique(i) avec P=cst

Interprétation des résultats :

le coefficient de mérite FOM il est augmenté linéairement avec l'augmentation de rapport massique (i) à pression intermédiaire P2 constant

V.3. La variation de FOM en fonction de (Y) de azote Pour différent i:

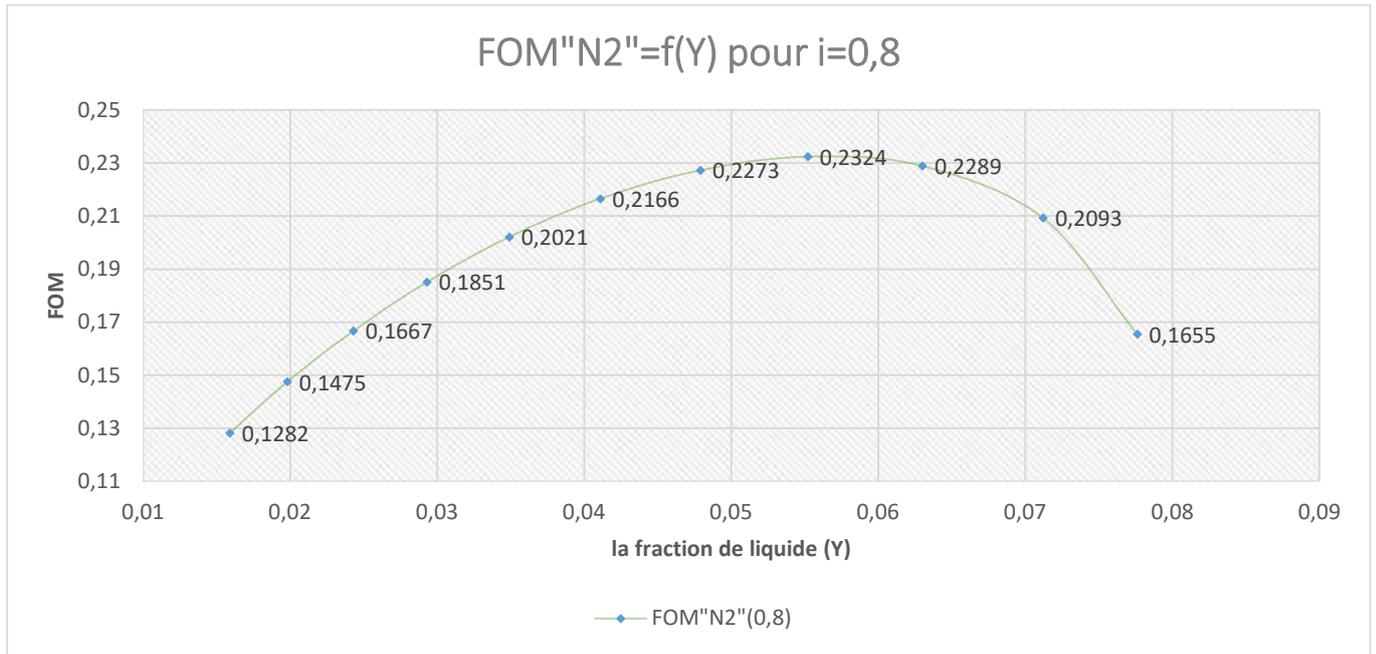


Figure V.17. Diagramme de la variation de FOM en fonction de Y pour un i =0.8

Y"N2"(I=0,8)	0,0159	0,0198	0,0243	0,0293	0,0349	0,0411	0,0479	0,0552	0,063	0,0712	0,0776
FOM"N2"(0,8)	0.1282	0.1475	0.1667	0.1851	0.2021	0.2166	0.2273	0.2324	0.2289	0.2093	0.1655

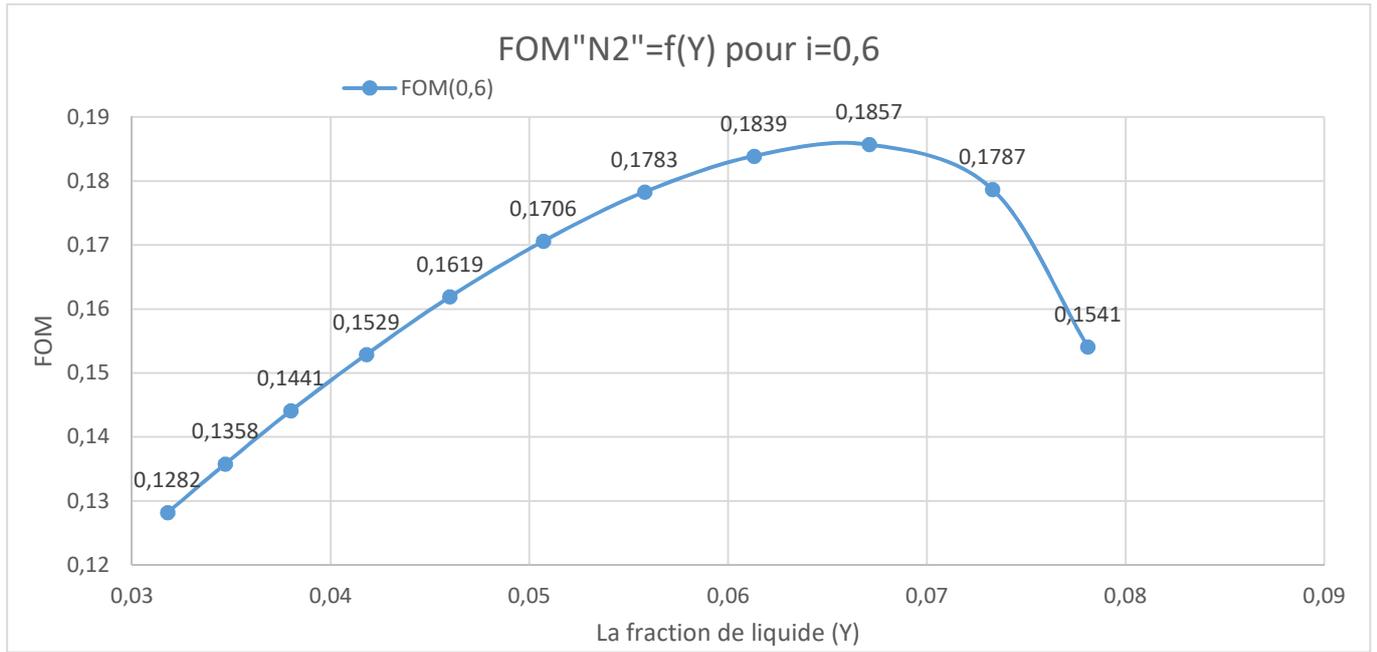


Figure V. 18. Diagramme de la variation de FOM en fonction de Y pour un i=0.6

Y"i=0,6"	0,0318	0,0347	0,0380	0,0418	0,0460	0,0507	0,0558	0,0613	0,0671	0,0733	0,0781
FOM"i=0,6"	0,1282	0,1358	0,1441	0,1529	0,1619	0,1706	0,1783	0,1839	0,1857	0,1787	0,1541

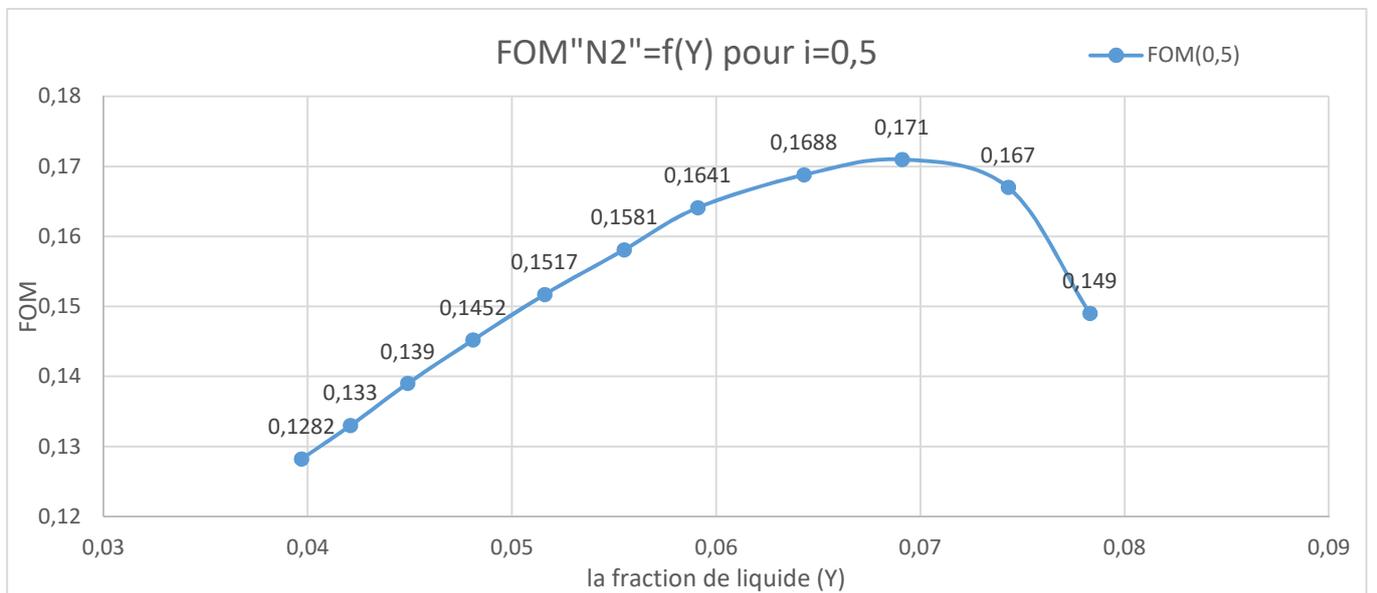


Figure V.19. Diagramme de la variation de FOM en fonction de Y pour un i=0.5

Y"i=0,5"	0,0397	0,0421	0,0449	0,0481	0,0516	0,0555	0,0579	0,0643	0,0691	0,0743	0,0783
FOM"i=0,5"	0,1282	0,133	0,139	0,1452	0,1517	0,1581	0,1641	0,1688	0,171	0,167	0,149

Interprétation des résultats :

On remarque que lorsque la fraction de liquide augmente le FOM passe par un maximum jusqu'à $y=0.0552$ pour $i=0.8$ puis il subit à une chute plus rapide.

Lorsque le i augmente le y diminue car la quantité de masse du gaz détendu dans la vanne diminue et le FOM augment est la valeur maximale de FOM égale à 0.2324 pour $i=0.8$.

Conclusion :

L'analyse énergétique du cycle de Linde a deux compresseurs évaluée sur :

- La pression intermédiaire, température à l'entrée de compresseur, le rapport massique.
- Le cycle de Linde est une modification du cycle de Linde Hampson, qui a pour but principal la réduction de travail requis avec une faible réduction du taux de liquidité.
- Il existe une plage de rapport de pression dans laquelle le fonctionnement est meilleur.
- Le point de fonctionnement désiré correspond à la pression intermédiaire ou le travail par unité de masse liquéfié est minimum.
- L'étude globale sera basée sur tous les paramètres influents donc il faut faire un compromis entre la fraction de liquide et le travail par unité de masse liquéfié et le FOM.
- Les usines de liquéfaction des gaz typique fonctionnent avec :
 $i=0.8, P_1=1\text{atm}, P_2=200\text{atm}, P_3=40\text{atm}$ jusqu'à 60atm.

Pour une meilleure performance des propriétés du cycle de liquéfaction de Linde, on recommande les paramètres pour chacun des fluides utilisés:

Fluide	I	P	Y	FOM
N2	0.8	60	0.0691	23.24%
CH4	0.8	60	0.1423	61.38%
O2	0.8	60	0.1774	15.52%

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce Modeste travail nous a permis de montrer la faisabilité de ce système cryogénique à fin de déterminer les paramètres performants de ce dernier.

La demande croissante de gaz liquide nous a Poussés à faire une étude thermodynamique sur un cycle de Linde de liquéfaction.

Dans le monde de liquéfaction, les liquéfacteur utilises en Algérie ou ailleurs sont ceux de Claude par le faible coût de réalisation et qui permettent une liquidité suffisante.

L'objectif principal de ce travail est de déterminer la faisabilité du fonctionnement adéquat pour ce cycle, et obtenir une grande quantité de masse liquéfiée qui Correspond à un minimum de consommation d'énergie et un FOM maximal.

L'analyse thermodynamique et énergétique effectuée nous a permis de calculer et évaluer les échanges ou cours des transformations (travail, chaleur, quantité de masse, rendement ...).

Nous avons fait l'évaluation du cycle d'après la variation des quelques paramètres qui influent sur les performances de ce cycle :

- La pression intermédiaire $P_2=60(\text{atm})$.
- Le rapport massique $i=m_i/m=0.8$.
- La variation de **FOM** en fonction de **Y** .

Nous avons utilisé le 'MATLAB' ainsi que le logiciel 'Refprop' afin de déterminer les performances du liquéfacteur.

Une expérimentation est nécessaire pour affronter nos résultats

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

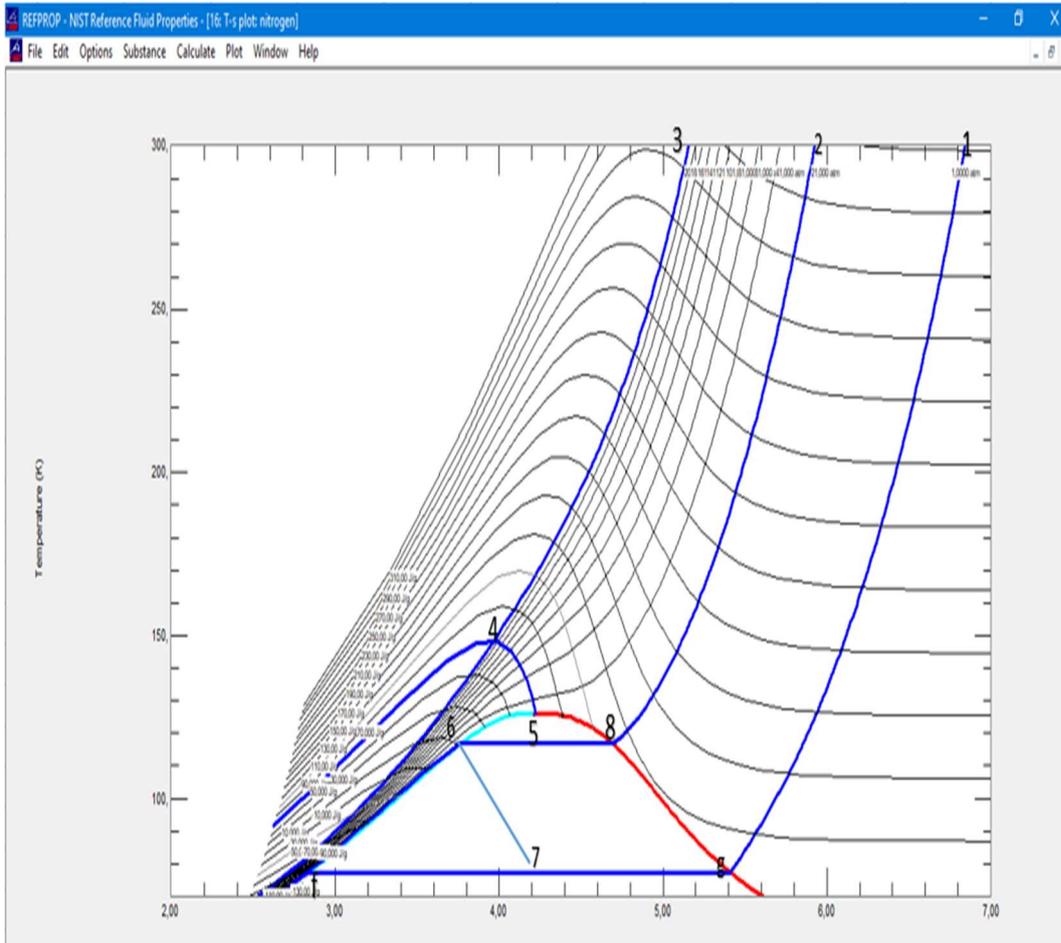
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [1] An introduction to cryogenics. Ph brun. CERN GENOVA.
- [2] Process design of turbo expander-based nitrogen liquefier.
- [3] Review A matter of degrees “a brief history of cryogenic” R.G. Ssurlock.
- [4] mémoire fin d'étude en master de Medjdoul Hamza « SEPARATION CRYOGENIQUE DE L'AIR » 2015.
- [5] Thèse doctorat « effet Thermique dans les Systèmes d'absorption (université de Québec a trois rivières).
- [6] Froid industrielle « propriété physique au basse températures ».
- [7] Cryogenic Process Engineering Klaus D. Timmerhaus · Thomas M. Flynn
- [8] livre MASSON EDITEUR. Paris1970.
- [9] The Linde group Réservoirs isolés sous vide pour le stockage d'azote, d'oxygène, d'argon et de dioxyde de carbone liquide.
- [10] stockage de gaz l'air cryogénique.
- [11] Société Air liquide France (azote pour cryogénie alimentaire ou pour l'industrie chimique).
- [12] cryosystems, tout ce qu'il vous faut pour le stockage à basse températures.
- [13] Klaus D. Timmerhaus et Richard Palmer Reed, Cryogenic Engineering: Fifty Years of Progress, 2007 (ISBN 978-0-387-46896-9), p. 8
- [14] ↑ Ebbe Almqvist, History of industrial gases, Springer Science & Business Media, 2003 (ISBN 978-0-306-47277-0, lire en ligne [archive]), p. 160
- [15] ↑ « The Linde building - where air became money » [archive], sur Kraft Museet
↑ Revenir plus haut en :a et b J. Ph. Pérez et A. M. Romulus, Thermodynamique, fondements et applications, Masson, 1993 (ISBN 2225842655), « 16. Production des très basses températures », p. 266-267

Annexes

Annexes

- Annex 1 : diagramme T-S de AZOTE :



REFPROP - NIST Reference Fluid Properties

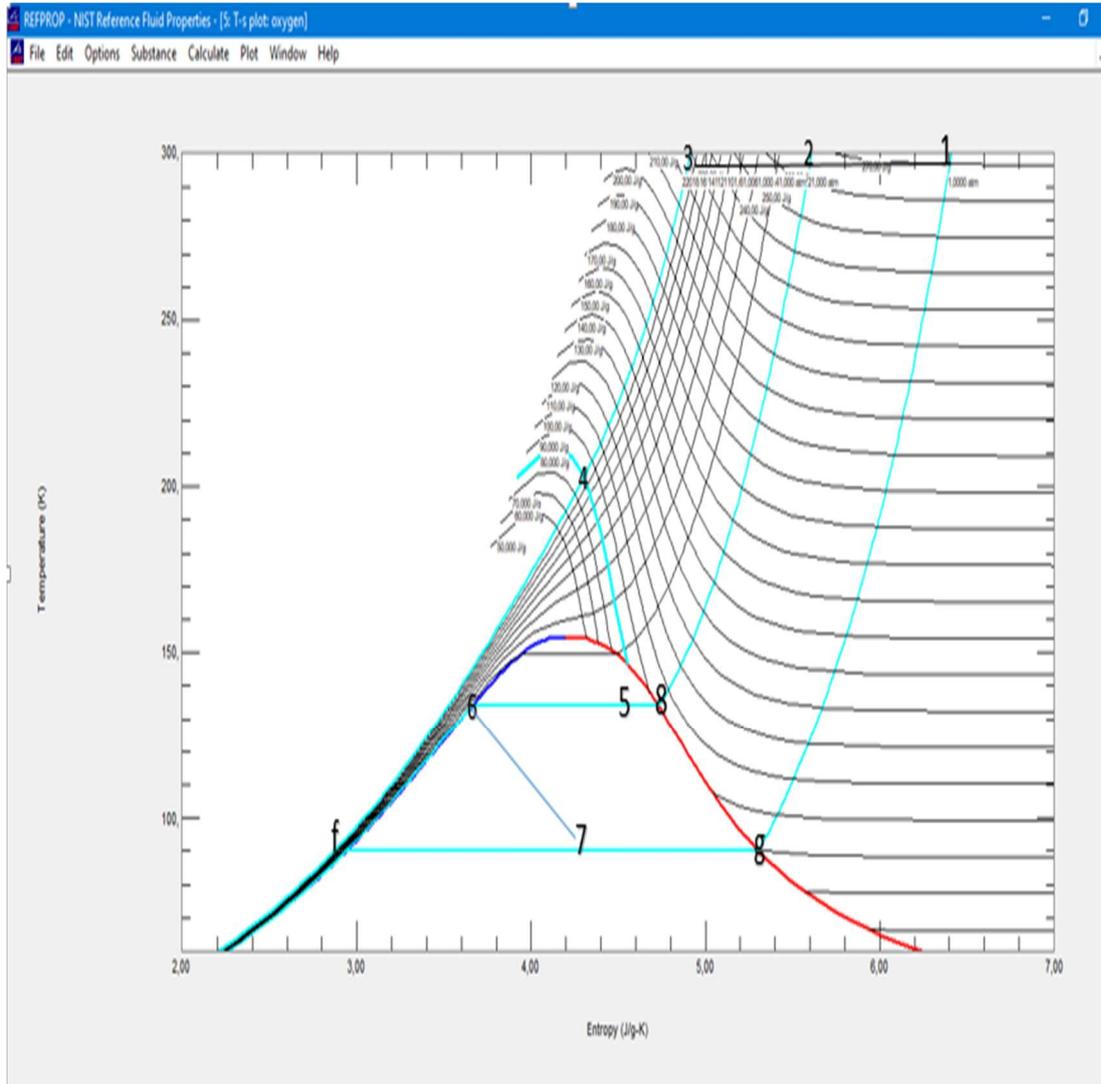
File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help

6: nitrogen: Specified state points

	Temperature (K)	Pressure (atm)	Density (g/m ³)	Enthalpy (J/g)	Entropy (J/g-K)
1	77,000	1,0000	807700,	-122,74	2,8248
2	294,00	1,0000	1161,5	304,95	6,8207
3	294,00	5,0000	5812,5	304,01	6,3401
4	294,00	20,000	23312,	300,59	5,9179
5	294,00	40,000	46707,	296,19	5,6982
6	294,00	60,000	70040,	292,03	5,5644
7	294,00	80,000	93159,	288,13	5,4661
8	294,00	100,00	115920,	284,51	5,3876
9	294,00	120,00	138180,	281,19	5,3220
10	294,00	140,00	159830,	278,18	5,2654
11	294,00	160,00	180770,	275,48	5,2157
12	294,00	180,00	200920,	273,09	5,1714
13	294,00	200,00	220260,	271,00	5,1316

Annexes

Annex 2: diagramme T-S de l'oxygène :



REFPROP - NIST Reference Fluid Properties

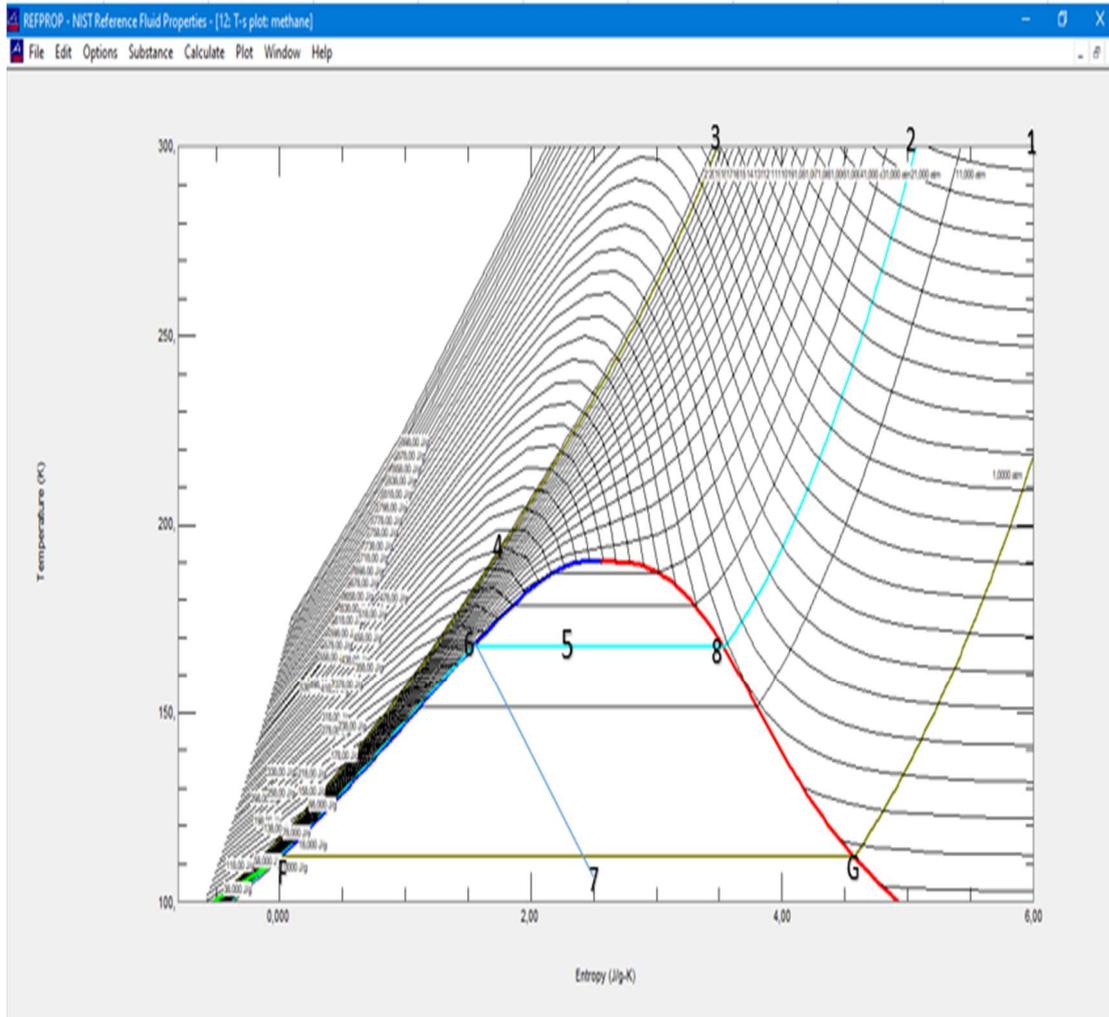
File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help

18: oxygen: Specified state points

	Temperature [K]	Pressure [atm]	Density [g/m ³]	Enthalpy [J/g]	Entropy [J/g-K]
1	91,000	1,0000	4423,3	80,473	5,3129
2	294,00	1,0000	1327,3	267,19	6,3943
3	294,00	5,0000	6654,9	266,17	5,9733
4	294,00	20,000	26888,	262,32	5,6027
5	294,00	40,000	54450,	257,23	5,4086
6	294,00	60,000	82593,	252,21	5,2895
7	294,00	80,000	111190,	247,30	5,2011
8	294,00	100,00	140070,	242,54	5,1298
9	294,00	120,00	169060,	237,96	5,0695
10	294,00	140,00	197940,	233,60	5,0170
11	294,00	160,00	226510,	229,49	4,9705
12	294,00	180,00	254570,	225,64	4,9287
13	294,00	200,00	281940,	222,09	4,8909

Annexes

- Annex 1 : diagramme T-S de le méthane :



REFPROP - NIST Reference Fluid Properties

File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help

20: methane: Specified state points

	Temperature (K)	Pressure (atm)	Density (g/m ³)	Enthalpy (J/g)	Entropy (J/g-K)
1	111,00	1,0000	423330,	-2,3214	-0,020851
2	294,00	1,0000	666,22	900,71	6,6432
3	294,00	5,0000	3355,8	896,64	5,7991
4	294,00	20,000	13803,	881,15	5,0422
5	294,00	40,000	28649,	860,01	4,6298
6	294,00	60,000	44554,	838,47	4,3647
7	294,00	80,000	61440,	816,83	4,1597
8	294,00	100,00	79083,	795,56	3,9886
9	294,00	120,00	97098,	775,22	3,8409
10	294,00	140,00	114980,	756,42	3,7118
11	294,00	160,00	132200,	739,60	3,5988
12	294,00	180,00	148360,	725,01	3,5000
13	294,00	200,00	163210,	712,67	3,4138