

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجبي مختار - عنابة

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIORAT
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER

INTITULÉ

OPTIMISATION DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES D'UNE INSTALLATION CRYOGÉNIQUE DE LIQUÉFACTION DE L'HÉLIUM

DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : ÉNERGÉTIQUE

PRÉSENTÉ PAR :

LAOUAR IMED

DIRECTEUR DU MÉMOIRE :

HAOUAM ABDALLAH

(MC-A) U.B.M. ANNABA

DEVANT LE JURY

PRÉSIDENT: MZAD H.

(Pr) U.B.M. ANNABA

EXAMINATEUR: MECHIGHEL F.

(MC-A) U.B.M. ANNABA

EXAMINATEUR: HAOUAM A.

(MC-A) U.B.M. ANNABA

Année : 2018/2019

OPTIMISATION DES
PERFORMANCES ENERGETIQUES
D'UNE INSTALLATION
CRYOGENIQUE DE
LIQUEFACTION DE L'HELIUM

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Au nom d'**Allah** le Tout Miséricordieux le Très Miséricordieux

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents, à ma sœur et à mon frère, à **ma famille** ainsi qu'à tous les enseignants qui m'ont inculqué **éducation et savoir** tout au long de mon cursus scolaire **et universitaire.**

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude en remerciant Monsieur HAOUAM Abdallah pour avoir accepté de m'encadrer. Un grand merci pour ses précieux conseils, pour son aide ainsi que pour sa gentillesse et sa grande disponibilité.

Je tiens à remercier également le Pr MZAD Hocine Président du jury et le Dr MECHIGHEL Farid membre du jury pour avoir examiné ce travail.

Résumé

Parmi tous les gaz existants, le plus intrigant et le plus intéressant à étudier est le gaz noble connu sous le nom de « Hélium », lequel possède des propriétés qui le rendent unique. En effet, l'hélium a la température d'ébullition la plus basse et est capable de se transformer en un superfluide, contrairement aux autres gaz. Sa liquéfaction est un procédé ambigu au cours duquel sa température doit être abaissée à 4,2 K, frôlant le zéro absolu. Le travail réalisé dans ce mémoire comprend le calcul des caractéristiques thermodynamiques des différents cycles associés à diverses installations cryogéniques destinées à la liquéfaction de l'hélium. L'optimisation des performances thermiques nous a conduit à dimensionner une installation de liquéfaction de l'hélium fonctionnant suivant un cycle combinant les processus de détente isenthalpique et de détente isentropique avec le refroidissement préalable de l'hélium par l'azote à l'état liquide saturé à 80 K et l'hydrogène liquide à 20 K. Enfin, une simulation des différents cycles thermodynamiques par le logiciel HYSYS V7.1 a confirmé l'exactitude des calculs effectués et une interprétation adéquate des résultats obtenus.

ملخص

من بين جميع الغازات الحالية ، فإن أكثر الغازات إثارة للفضول وإثارة للاهتمام هو الغاز النبيل المعروف باسم "الهيليوم". لديه خصائص تجعله فريدا من نوعه. في الواقع ، الهيليوم لديه أدنى درجة حرارة غليان وقادر على التحول إلى سائل فائق ، على عكس الغازات الأخرى. ومع ذلك ، فإن تسييل الهيليوم تعتبر عملية صعبة حيث يجب خفض درجة حرارته إلى 4.2 K بالقرب من الصفر المطلق. يشمل العمل المنجز في هذه الرسالة حساب الخصائص الديناميكية الحرارية للدورات المختلفة المرتبطة بالتركيبات المبردة المختلفة. قادنا تحسين الأداء الحراري إلى تصميم محطة تسييل الهيليوم تعمل على دورة تجمع بين التمدد isenthalpic وعملية التمدد isentropic مع التبريد السابق للهيليوم بالنيتروجين في الحالة السائلة المشبعة عند 80 K والهيدروجين السائل عند 20 K. أخيراً، أكدت محاكاة الدورات الديناميكية الحرارية المختلفة (باستعمال برنامج HYSYS V7.1) دقة الحسابات التي تم إجراؤها وتفسير وافٍ للنتائج التي تم الحصول عليها.

Abstract

Among all the existing gases, the most intriguing and interesting to study is the noble gas known as the "Helium". It has properties that make it unique. Indeed, helium has the lowest boiling temperature and is able to be transformed into super fluid, unlike other gases. However, the liquefaction of helium is an ambiguous method in which its temperature must be lowered to 4.2 K brushing absolute zero. The work done in this specification comprises calculating the thermodynamic characteristics of the different liquefaction helium cycles associated with various cryogenic installations. Optimization of thermal performance has led us to design a cryogenic plant operating according to a cycle combining the isenthalpic expansion process and the isentropic expansion of the pre-cooling helium with nitrogen in the liquid saturated condition at 80 K and liquid hydrogen at 20 K. Finally, a simulation by HYSYS V7.1, of different thermodynamic cycles confirmed the accuracy of the calculations made and an adequate interpretation of the results obtained.

NOMENCLATURE

Abréviations utilisées

ES : Etranglement simple
RP : Refroidissement préalable
FR : Fluide réfrigérant
EC: Echangeur de chaleur
PMB : Point Mort Bas
PMH : Point Mort Haut
BP : Basse Pression
HP : Haute Pression
IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

Symboles utilisés

x : Coefficient de liquéfaction
 ΔH_T : Effet isothermique d'étranglement
 q_{in} : Imperfection de l'échangeur de chaleur
 q_a : Apport de chaleur
 ΔT : Différence de température
 C_p : Chaleur spécifique à pression constante
 C_v : Chaleur spécifique à volume constant
 $q_{0\text{ totale}}$: Quantité de chaleur enlevée du gaz de travail par le liquide réfrigérant
 $q_{x\text{ supp}}$: Puissance frigorifique supplémentaire nécessaire au refroidissement préalable
 G_o : Quantité du liquide réfrigérant
 h : Enthalpie massique
 T : Température
 S : Entropie
 W_{supp} : Travail supplémentaire
 r : Constante spécifique des gaz
 η_k : Rendement du compresseur
 W_k : Travail du compresseur
 β : Coefficient correcteur
 W_{total} : Travail total
 W_o : Travail spécifique
 q_x : Puissance frigorifique du cycle
 $\varepsilon_{\text{réel}}$: Coefficient frigorifique réel
 ε_{th} : Coefficient frigorifique théorique
 η : Rendement thermodynamique

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Diagramme Pression-Température des phases de l'hélium

Figure II.1 : Diagramme Pression-Température de l'eau

Figure II.2 : Cycle idéal de liquéfaction

Figure II.3 : Transformations thermodynamiques inverses de liquéfaction d'un gaz

Figure II.4 : Schéma du procédé et cycle de Brayton inverse associé au processus

Figure II.5 : Schéma du cycle à étranglement simple de Linde

Figure II.6 : Diagramme du cycle à étranglement simple (E.S) de Linde

Figure II.7 : Schémas des cycles à étranglement E.S à un seul étage de R.P

Figure II.8 : Diagramme du cycle à étranglement avec un étage de R.P

Figure II.9 : Schéma du processus combiné avec branchement du détenteur au niveau initial de température

Figure II.10 : Schéma du processus combiné avec branchement au niveau intermédiaire de température

Figure II.11 : Schéma du processus combiné avec branchement au niveau inférieur de température

Figure II.12 : Schéma du cycle combiné associé au processus avec branchement du détenteur au niveau inférieur de température

Figure II.13 : Schéma du procédé de liquéfaction en cascade

Figure II.14 : Cycle associé au processus de liquéfaction en cascade

Figure III.1 : Schéma du processus de liquéfaction à étranglement simple et cycle associé au processus à E.S

Figure III.2 : Schéma du processus de liquéfaction et cycle à étranglement simple avec un étage de R.P

Figure III.3 : Schéma du processus de liquéfaction et cycle à étranglement avec deux étages de R.P : azote liquide saturé à 80K et azote sous vide à 65K

Figure III.4 : Schéma du processus de liquéfaction et cycle à étranglement avec deux étages de R.P : azote liquide saturé à 80K et hydrogène liquide à 20K

Figure III.5 : Cycle de liquéfaction de l'hélium en coordonnées T-S : R.P avec azote liquide saturé à 80 K et hydrogène liquide à 20 K ($P_2 = 15\text{atm}$).

Figure III.6 : Cycle de liquéfaction de l'hélium en coordonnées T-S : R.P avec azote liquide saturé à 80 K et hydrogène liquide à 20 K ($P_2 = 20\text{atm}$).

Figure III.7 : Cycle de liquéfaction de l'hélium en coordonnées T-S : R.P avec azote liquide saturé à 80 K et hydrogène liquide à 20 K ($P_2 = 25\text{atm}$).

Figure III.8 : Evolution de la consommation d'énergie spécifique en fonction de la pression de refoulement

Figure III.9 : Evolution du rendement thermodynamique et du coefficient de liquéfaction de l'hélium en fonction de la pression de refoulement

Figure III.10 : Schéma du processus combiné et du cycle associé au processus de liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détenteur à $T=20\text{K}$ et un taux de détente $\tau=25$

Figure III.11 : Représentation du cycle combiné en coordonnées T-S à 2 étages R.P avec azote liquide saturé à 80 K et hydrogène liquide à 20 K utilisant la détente adiabatique et de l'étranglement isenthalpique avec ($P_2= 25\text{atm}$).

Figure IV.1 : Compresseur mono-vis

Figure IV.2 : Compresseur double-vis

Figure IV.3 : Liaison mécanique dans un compresseur à piston

Figure IV.4 : Echangeur à co-courants

Figure IV.5 : Echangeur à contre-courants

Figure IV.6 : Echangeur à courants croisés

Figure IV.7 : Echangeur à tubes et calandre

Figure IV.8 : Types d'échangeurs de chaleur à faisceaux tubulaires et calandre

Figure IV.9 : Vues diverses d'échangeurs de chaleur à faisceaux tubulaires et calandre

Figure IV.10 : Arrangement des tubes au niveau d'un échangeur de chaleur pour les pas carré et triangulaire

Figure IV.11 : Variations de température du gaz de travail dans l'échangeur E1 du cycle à E.S avec R.P

Figure IV.12 : Arrangement des tubes de l'échangeur tubulaire (pas carré)

Figure IV.13 : Echangeur tubulaire E1 du cycle hélium à étranglement simple avec R.P

Figure. V. 1 : Représentation des dix premières étapes de la simulation des cycles cryogéniques

Figure. V. 2 : Installation du cycle à ES pour la liquéfaction de l'azote avec $P_2=200$ bars

Figure. V. 3 : Installation du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'azote avec $P_2=200$ bars

Figure. V.4 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau initial de température et un taux de détente $\tau=200$

Figure. V.5 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau intermédiaire de température et un taux de détente $\tau=200$

Figure. V.6 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau inférieur de température et un taux de détente $\tau=200$

Figure. V.7 : Installation du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hydrogène avec $P_2=160\text{atm}$

Figure. V.8 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hydrogène avec un branchement du détendeur au niveau intermédiaire de température et un taux de détente $\tau=120$

Figure. V. 9 : Installation du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec $P_2=15\text{atm}$

Figure. V. 10 : Installation du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec $P_2=20\text{atm}$

Figure. V. 11 : Installation du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec $P_2=25\text{atm}$

Figure. V. 12 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à $T=65\text{K}$ et un taux de détente $\tau=25$

Figure. V. 13 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à $T=45\text{K}$ et un taux de détente $\tau=25$

Figure. V. 14 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à $T=20\text{K}$ et un taux de détente $\tau=25$

Figure. V. 15 : Allure des courbes de variation du flux de chaleur, de la différence de température et du coefficient d'échange global en fonction de la température au niveau de l'échangeur LNG-100 du cycle combiné avec branchement du détendeur à $T=20K$ pour la liquéfaction de l'hélium.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Principaux constituants de l'air sec

Tableau I.2 : Température de saturation des principaux composants de l'air

Tableau I.3 : Propriétés physiques de l'air sec

Tableau I.4 : Propriétés physiques de l'azote

Tableau I.5 : Propriétés physiques de l'argon

Tableau I.6 : Propriétés physiques de l'oxygène

Tableau I.7 : Propriétés physiques de l'hydrogène

Tableau I.8 : Propriétés physiques de l'hélium

Tableau I.9 : Propriétés des isotopes stables de l'hélium

Tableau I.10 : Capacité de production de la centrale à oxygène de l'entreprise SIDER EL HADJAR-Annaba (2018-2019)

Tableau III.1 : Points figuratifs du cycle à 2 étages de liquéfaction de l'hélium : R.P avec azote liquide à 80 K et R.P avec hydrogène liquide à 20 K ($P_2 = 15\text{atm}$).

Tableau III.2 : Points figuratifs du cycle à 2 étages de liquéfaction de l'hélium : R.P avec azote liquide à 80 K et R.P avec hydrogène liquide à 20 K ($P_2 = 20\text{atm}$)

Tableau III.3 : Points figuratifs du cycle à 2 étages de liquéfaction de l'hélium : R.P avec azote liquide à 80 K et R.P avec hydrogène liquide à 20 K ($P_2 = 25\text{atm}$)

Tableau III.4 : Tableau récapitulatif des résultats des calculs des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique à 2 étages R.P avec azote liquide à 80 K et R.P avec hydrogène liquide à 20 K.

Tableau III.5 : Points figuratifs du cycle à 2 étages de liquéfaction de l'hélium : R.P avec azote liquide à P_{atm} à 80 K et R.P avec hydrogène liquide à 20 K utilisant la combinaison de la détente adiabatique et de l'étranglement isenthalpique ($P_2 = 25\text{atm}$)

Tableau III.6 : Caractéristiques thermodynamiques du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium

Tableau IV.1 : Caractéristiques du compresseur à pistons choisi

Tableau IV.2 : Propriétés thermiques du fluide chaud

Tableau IV.3 : Propriétés thermiques du fluide froid

Tableau IV.4 : Normes des tubes en fonction du diamètre de la calandre

Tableau IV.5 : Tableau récapitulatif des caractéristiques de l'écoulement des fluides chaud et froid

Tableau V.1 : Points figuratifs du cycle à ES pour la liquéfaction de l'azote avec $P_2 = 200\text{bars}$

Tableau V.2 : Points figuratifs du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'azote avec $P_2 = 200\text{bars}$

Tableau V.3 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau initial de température et un taux de détente $\tau = 200$

Tableau V.4 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau intermédiaire de température et un taux de détente $\tau=200$

Tableau V.5 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau inférieur de température et un taux de détente $\tau=200$

Tableau V.6 : Points figuratifs du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hydrogène avec $P_2=160\text{atm}$

Tableau V.7 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hydrogène avec un branchement du détendeur au niveau intermédiaire de température et un taux de détente $\tau=120$

Tableau V.8 : Points figuratifs du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec $P_2=15\text{atm}$

Tableau V.9 : Points figuratifs du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec $P_2=20\text{atm}$

Tableau V.10 : Points figuratifs du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec $P_2=25\text{atm}$

Tableau V.11 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à $T=45\text{K}$ et un taux de détente $\tau=25$

Tableau V.12 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à $T=20\text{K}$ et un taux de détente $\tau=25$

Tableau V.13: Liquéfaction de l'azote à $P_2=200$ bars

Tableau V.14 : Liquéfaction de l'hydrogène à 160 et à 120 bars

Tableau V.15 : Comparaison des résultats calculés et simulés des cycles à E.S avec deux (02) étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote liquide saturé à $T=80\text{K}$ et l'hydrogène liquide à $T=20\text{K}$ pour la liquéfaction de l'hélium

Tableau V.16 : Comparaison des résultats calculés et simulés des cycles combinés pour la liquéfaction de l'hélium avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote liquide saturé à $T=80\text{K}$ et l'hydrogène liquide pour un branchement du détendeur à $T=20\text{K}$.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I. GENERALITES SUR LES GAZ INDUSTRIELS	2
I.1. Introduction	2
I.2. Les gaz industriels	2
I.3. Définitions et propriétés de quelques gaz permanents	2
I.3.1. L'air	2
I.3.2. L'Azote	3
I.3.3. L'Argon	4
I.3.4. L'Oxygène	5
I.3.5. L'Hydrogène	5
I.3.6. L'Hélium	6
I.4. Localisation de l'hélium	7
I.4.1 Provenance de l'hélium	7
I.4.2. Utilisation et particularité de l'hélium	7
I.4.3. Particularité de l'hélium	9
I.5. Les principaux producteurs de gaz industriels [21-24]	10
I.5.1. Air Products	10
I.5.2. Linde AG	10
I.5.3. Air Liquide	10
I.5.4. Praxair	10
I.5.5. L'entreprise nationale Sonatrach	11
I.5.6. La centrale à oxygène de l'entreprise nationale SIDER EL HADJAR-Annaba	11
Chapitre II. PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ ET CYCLES THERMODYNAMIQUES ASSOCIES	12
II.1. Généralités sur la liquéfaction des gaz	12
II.2. Les cycles de base pour la liquéfaction des gaz	13
II.2.1. Cycle idéal de liquéfaction	13
II.2.2. Cycle théorique de Brayton inverse	14
II.2.3. Cycle à étranglement simple ou cycle de LINDE	14
II.2.4. Le cycle à étranglement avec refroidissement préalable (E.S+R.P)	17
II.2.5. Le cycle combiné ou cycle de CLAUDE	20
II.2.6. Cycle en cascade	25
Chapitre III. ETUDE THERMODYNAMIQUE DES INSTALLATIONS ET CYCLES CRYOGENIQUES DE LIQUEFACTION DE L'HELIUM	27

III.1. Cycle à étranglement simple de LINDE ou cycle E.S	27
III.2. Cycle à étranglement simple ES avec un étage de refroidissement préalable (R.P) à l'aide de l'azote à 80K	29
III.3 Cycle à étranglement simple avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote à 80K et de l'azote sous vide à 65 K	31
III.4. Cycle à étranglement simple avec deux étages de R.P fonctionnant avec de l'azote à 80 K et de l'hydrogène à 20 K.....	33
III.4.1. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique avec $P_2=1\text{MPa}$	34
III.4.2. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique avec $P_2=1.5\text{MPa}$	34
III.4.3. Calcul des paramètres de l'installation avec $P_2 =2\text{MPa}$	39
III.4.4. Calcul des paramètres de l'installation avec $P_2=2.5\text{MPa}$	43
III.4.5. Représentation graphique de l'évolution des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique à 2 étages.....	47
III.5. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec deux étages de refroidissement préalable R.P utilisant de l'azote à 80K et de l'hydrogène à 20 K avec branchement du détendeur à $T=20\text{K}$	48
III.5.1. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique avec $P_2=25\text{ atm}$	49
III.6. Comparaison du cycle combiné avec le cycle à étranglement simple à deux étages de R.P fonctionnant avec de l'azote liquide à 80 K et de l'hydrogène liquide à 20 K à la pression $P_2=25\text{atm}$	54
Chapitre IV. DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ORGANES DE L'INSTALLATION CRYOGENIQUE DE LIQUEFACTION DE L'HELIUM.....	55
IV.1 Introduction	55
IV.2 Les compresseurs	55
IV.2.1 Les différents types de compresseurs.....	55
IV.2.2 Fonctionnement des compresseurs volumétriques à pistons	55
IV.2.3 Fonctionnement des compresseurs à vis	56
IV.2.4. Principaux organes des compresseurs à pistons.....	58
IV.3 Calcul thermodynamique des caractéristiques du compresseur à pistons de l'installation de liquéfaction de l'hélium.....	59
IV.3.1 Choix du taux de compression optimal.....	59
IV.3.2. Calcul du débit massique.....	60
IV.3.3. Calcul du volume de gaz aspiré par le compresseur	60
IV.3.4. Calcul du volume de gaz balayé par le compresseur.....	60

IV.3.5.	Calcul de la cylindrée	60
IV.3.6.	Choix des dimensions des pistons du compresseur	60
IV.3.6	Vérification des dimensions choisies.....	61
IV.4.	Dimensionnement de l'échangeur de chaleur	61
IV.4.1.	Définition.....	61
IV.4.2.	Classification des échangeurs de chaleur.....	61
IV.4.3.	Les échangeurs à faisceaux tubulaires et calandre	63
IV.5	Calcul thermique de l'échangeur tubulaire E1 du cycle hélium à étranglement simple avec R.P.....	66
IV.5.1.	Calcul du flux thermique	66
IV.5.2.	Propriétés des fluides chaud et froid	66
IV.5.3.	Calcul du rapport des taux de capacités thermiques	67
IV.5.4.	Calcul du flux thermique maximal.....	67
IV.5.5.	Calcul de l'efficacité de l'échangeur.....	68
IV.5.6.	Calcul de la différence de température logarithmique moyenne ΔTLM	68
IV.5.7.	Correction de la différence de température logarithmique moyenne ΔTLM	68
IV.5.8.	Calcul du coefficient d'échange interne (coté tubes).....	69
IV.5.9.	Calcul du coefficient d'échange externe (coté calandre).....	70
IV.5.10.	Calcul du coefficient d'échange global.....	71
IV.5.11.	Calcul de la surface d'échange	72
IV.5.12.	Calcul de la longueur des tubes.....	72
IV.6	Rapport entre l'efficacité de l'échangeur et le coefficient de liquéfaction de l'installation cryogénique.....	73
IV.6.1	Cycle à étranglement simple avec R.P	73
IV.6.2	cycle combiné.....	74
Chapitre V. SIMULATION DES CYCLES CRYOGENIQUES DE LA LIQUEFACTION DE L'HELIUM EN UTILISANT LE LOGICIEL HYSYS V7.1.....		
76		
V.1.	Etapas de simulation	76
V.2.	Liquéfaction de l'azote T=77K	79
V.2.1	Cycle à étranglement simple pour la liquéfaction de l'azote	79
V.2.2.	Cycle à étranglement simple avec refroidissement préalable utilisant un fluide frigorigène (à T=230K) pour la liquéfaction de l'azote.....	80
V.2.3.	Cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec branchement du détendeur au niveau initial à T=300K	82
V.2.4.	Cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec refroidissement préalable pour un branchement du détendeur au niveau intermédiaire à T=230K.....	84

V.2.5. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec refroidissement préalable à 230K pour un branchement du détendeur à un niveau intermédiaire à T=160K.....	86
V.3. Liquéfaction de l'hydrogène T=20K.....	87
V.3.1. Cycle à étranglement simple avec deux étages de refroidissement préalable (utilisant de l'azote liquide saturé à la pression atmosphérique à 80K et de l'azote sous vide 65K pour la liquéfaction de l'hydrogène	88
V.3.2. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'hydrogène avec un étage de refroidissement préalable utilisant de l'azote avec un branchement du détendeur à T=80K	90
V.4. Cycles cryogéniques pour la liquéfaction de l'hélium	92
V.4.1. Cycle à étranglement simple avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote liquide saturé à 80K et de l'hydrogène liquide à 20K pour la liquéfaction de l'hélium.....	92
V.4.2. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un étage de refroidissement préalable utilisant de l'azote liquide pour un branchement du détendeur à T=65K	98
V.4.3. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote 80K et de l'azote sous vide 65K pour un branchement du détendeur à T=45K	99
V.4.4. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote à 80K et de l'hydrogène pour un branchement du détendeur à T=20K.....	101
V.5. Interprétation des résultats de la simulation des différents cycles cryogéniques de liquéfaction des gaz utilisés : azote, hydrogène et hélium	104
CONCLUSION GENERALE	106
REFERENCES	108
ANNEXES.....	111

INTRODUCTION GENERALE

L'étude thermodynamique des gaz industriels : air, azote, oxygène, hydrogène, argon, méthane et hélium est un domaine très passionnant aussi bien en sciences physiques qu'en énergétique, car ils peuvent être utilisés sous différentes formes (gazeuses et liquides). Certains gaz sont employés comme fluides frigorigènes ou gaz de travail dans les installations cryogéniques.

Ils sont ainsi utilisés dans différents domaines : industriel, médical et même au quotidien...ils possèdent des propriétés physiques intéressantes. Parmi ces gaz, l'Hélium, exploité aussi bien à l'état liquide que gazeux ; il est connu comme étant un gaz noble dont les multiples caractéristiques sont très remarquables, suscitant ainsi l'intérêt de nombreux chercheurs.

A l'état liquide, l'hélium est considéré comme étant la matière la plus froide sur terre. Il peut également adopter une seconde forme d'état liquide et dans ce cas est appelé « Superfluide ». Cependant, sa liquéfaction demeure un véritable défi du fait que sa température doit avoisiner le « zéro absolu ».

Ce mémoire a pour objectif le calcul thermodynamique des cycles cryogéniques permettant de choisir les installations les plus performantes, nécessaires à la liquéfaction de l'Hélium. Ce travail est structuré en cinq (05) chapitres comme suit :

- Chapitre I : Généralités sur les gaz industriels
- Chapitre II : Procédés de liquéfaction des gaz et cycles thermodynamiques associés
- Chapitre III : Etude thermodynamique des installations et cycles cryogéniques de liquéfaction de l'hélium
- Chapitre IV : Dimensionnement des principaux organes de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'hélium.
- Chapitre V : Simulation des cycles des installations cryogéniques de liquéfaction de l'hélium.

Enfin, le mémoire s'achève par une conclusion générale dans laquelle le travail réalisé est synthétisé, faisant ressortir les principaux résultats des étapes franchies pour la détermination d'une installation cryogénique aux performances optimales pour la liquéfaction de l'hélium.

Chapitre I. GENERALITES SUR LES GAZ INDUSTRIELS

I.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré essentiellement à l'étude des propriétés physiques des gaz industriels avec une attention particulière à l'hélium, fluide à liquéfier au sein d'une installation cryogénique qui sera déterminée ultérieurement.

I.2. Les gaz industriels

Les gaz industriels connus sous le nom de « gaz atmosphériques » sont des gaz qui composent l'air que nous respirons. Utilisés dans plusieurs domaines, ils ont des propriétés différentes les unes par rapport aux autres, ils sont très utiles notamment dans le domaine industriel, dans notre vie quotidienne mais aussi dans le domaine médicale. [1-4]

I.3. Définitions et propriétés de quelques gaz permanents

I.3.1. L'air [5-8]

Tableau I.1 : Principaux constituants de l'air sec

Gaz constituants l'air sec	Pourcentage % en volume
Azote	78,09
Dioxygène	20,95
Argon	0,93
Dioxyde de carbone	0,035
Néon	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Hélium	$5,24 \cdot 10^{-4}$
Krypton	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Hydrogène	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Xénon	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Ozone	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Radon	$6,0 \cdot 10^{-18}$

L'air que nous respirons représente, avec la terre, le feu et l'eau, l'un des éléments constitutifs du monde. C'est un mélange de gaz, d'humidité et de particules polluantes (Bactéries, poussières...etc.).

Constituant l'atmosphère de la Terre, il est incolore (invisible) et inodore. Cet air peut être dépourvu d'humidité et d'impuretés, on parle donc d'air sec filtré qui pourra être utilisé dans plusieurs domaines (agent de pression pour les outils pneumatiques, dans les moteurs à piston) ou bien utiliser ces composant en les séparent. Les températures de saturation des principaux composants de l'air sont représentées sur le tableau I.2.

Tableau I.2 : Température de saturation des principaux composants de l'air

Gaz	N ₂	O ₂	Ar	Ne	He	H ₂
Température d'ébullition (°C)	-195,79	-183	-185,85	-246,05	-268,93	-252,76

Tableau I.3 : Propriétés physiques de l'air sec

Masse molaire (g/mol)	28,9653
Masse volumique (kg/m ³)	1,293
Température de fusion (K)	56.95=-216,2°C
Température d'ébullitions (K)	78.85=-194,3 °C
Température critique (°C)	-140.73
Pression critique (bar)	37.74

Chaleur latente de vaporisation (air) : $L_v = 204.1$ kJ/kg

Conductivité thermique (air) : 0.0234 W/m. K

Les principaux constituants de l'air (l'azote, l'oxygène et l'argon) peuvent être séparés par liquéfaction en une succession d'étapes. [9]

Etape 1 : Préparation de l'air

- Aspiration et filtration de l'air ;
- Compression de l'air atmosphérique jusqu'à $P_2 = 5$ à 6 bars ;
- Refroidissement de l'air après compression dans des tours de refroidissement et de lavage ;
- Elimination de toute trace d'hydrocarbures et d'humidité dans des tamis moléculaires ;

Etape 2 : refroidissement cryogénique et séparation des gaz de l'air

- Passage de l'air qui a été préparé dans des échangeurs de chaleur et des turbines afin d'obtenir des températures cryogéniques de l'ordre de -130°C ;
- L'air et les gaz refroidis seront liquéfiés et séparés dans des colonnes dites : colonnes de séparation ;
- L'oxygène liquéfié est extrait à -183°C , L'argon est extrait à -186°C , L'azote est extrait à -196°C ;
- Stockages et/ou distribution;

I.3.2. L'Azote [10]

L'azote est l'élément chimique de numéro atomique 7 découvert en 1772 par DANIEL Rutherford, de symbole N (du latin nitrogenium). C'est le composant principale de l'air il est incolore, inodore et ininflammable. Il est plus léger que l'eau quand il est à l'état liquide. Utilisé essentiellement pour créer une atmosphère inerte pour les processus chimiques.

Tableau I.4 : Propriétés physiques de l'azote

Numéro atomique	7
Masse molaire (g/mol)	14.0067
Masse volumique (kg/m ³)	0.001251
Température de fusion (K)	63.25
Température d'ébullitions (K)	77.35
Structure électronique	K ² L ⁵
Configuration électronique	1s ² 2s ² 2p ³
Rayon atomique	92pm
Charge de l'ion	N ³⁻
Température critique (°C)	-146.95
Pression critique (bar)	34.00
Température point triple (°C)	-210.00
Pression point triple (bar)	0.125

I.3.3. L'Argon [11]

Utilisé essentiellement pour créer une atmosphère inerte (autour des filaments dans les ampoules, comme isolant dans les vitrages...), agent protecteur pour le soudage, également les lasers à argon utilisée en chirurgie pour les problèmes oculaires, aussi pour gonfler les combinaisons de plongée sous-marine, enfin comme agent extincteur ainsi qu'en technologie alimentaire ...

Tableau I.5 : Propriétés physiques de l'argon

Numéro atomique	18
Masse molaire (g/mol)	39.948
Masse volumique (kg/m ³)	0.001784
Température de fusion (K)	83.8
Température d'ébullitions (K)	87.3
Structure électronique	K ² L ⁸ M ⁸
Configuration électronique	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶
Rayon atomique	71pm
Température critique (°C)	-122
Pression critique (bar)	48.98
Température point triple (°C)	-189.37
Pression point triple (bar)	0.687

I.3.4. L'Oxygène [12]

Découvert en 1774 par Carl Wilhelm Scheele, c'est l'élément que l'on trouve en abondance sur terre. Utilisé dans plusieurs domaines, en médecine (équipements respiratoires, fabrication de produits pharmaceutiques), en industrie (combustion dans les hauts fourneaux et élimination d'impuretés dans les aciéries), dans la vie quotidienne (notamment pour le chauffage et dans d'autres domaines).

Avec son effet oxydant, respectivement comburant, il doit être utilisé avec précautions et doit être stocké séparément des matières combustibles.

Tableau I.6 : Propriétés physiques de l'oxygène

Numéro atomique	8
Masse molaire (g/mol)	15.9994
Masse volumique (kg/m ³)	0.00142897
Température de fusion (K)	54.75
Température d'ébullitions (K)	90.25
Structure électronique	K ² L ⁶
Configuration électronique	1s ² 2s ² 2p ³
Rayon atomique	48pm
Charge de l'ion	O ²⁻
Température critique (°C)	-118.57
Pression critique (bar)	50.43
Température point triple (°C)	-218.80
Pression point triple (bar)	0.0015

I.3.5. L'Hydrogène [13-15]

L'hydrogène est un gaz monoatomique découvert en 1766 par Henry Cavendish, le plus léger de symbole H, son noyau contient un seul proton et donc il gravite autour de lui qu'un seul électron. L'hydrogène se présente sous forme de molécules H₂ (dihydrogène), on le trouve en abondance dans tout l'univers, il est lié à l'oxygène pour former l'H₂O (vapeur). Dans les molécules d'eau sous forme d'ion H⁺(Cation), on peut donc l'extraire par électrolyse. Comme il se trouve dans les hydrocarbures, Il peut être aussi extrait par reformage du méthane CH₄.

Les isotopes de l'hydrogène sont le protium ¹H (en abondance), le deutérium ²H (2% dans la nature) et le tritium ³H (de petite quantité).

L'hydrogène est utilisé dans les piles à combustible pour produire de l'électricité (moteur électrique), pour la combustion (fusées) Il occupe un très grand volume à l'état gazeux, ce qui n'est pas très pratique. On le comprime pour diminuer l'espace qu'il occupe, il est liquéfié à T=20.25 K.

Tableau I.7 : Propriétés physiques de l'hydrogène

Numéro atomique	1
Masse molaire (g/mol)	1.0079
Masse volumique (kg/m ³)	0.0000899
Température de fusion (K)	14.05
Température d'ébullitions (K)	20.25
Structure électronique	K ¹
Configuration électronique	1s ¹
Rayon atomique	53pm
Charge de l'ion	H ⁺ , H ⁻
Température critique (°C)	-239.91
Pression critique (bar)	12.38
Température point triple (°C)	-259.20
Pression point triple (bar)	0.072

Caractéristique de sa phase gazeuse :

Masse volumique : 0,085 kg/m³

Conductivité thermique : 0.16835 W/m. K

Caractéristique de sa phase liquide :

Masse volumique : 70.97 kg/m³

Chaleur latente de vaporisation : 454,3 kJ/kg

Caractéristique de sa phase solide :

Chaleur latente de fusion: 58,158 kJ/kg

I.3.6. L'Hélium [16-17]

Découvert en 1895 par Pierre Jules César Jansen et Joseph Norman Lockyer,

L'Hélium possède des propriétés très intéressantes et uniques parmi tous les éléments. De symbole « He » c'est le gaz noble le plus répandu dans l'univers observable. Il est inodore, incolore et sera le 2^{ème} après l'hydrogène en terme d'abondance, Il est situé dans le coin supérieur droit du tableau périodique de Mendeleiev. Son numéro atomique est égal à 2.

C'est un gaz inerte utilisé en raison de sa légèreté (par rapport à l'air), du fait que sa masse molaire est presque 7 fois plus petite que celle de l'air.

$$M(\text{He}) = 4 \text{ g/mole}$$

$$M(\text{Air}) = 29 \text{ g/mole}$$

L'hélium flotte facilement au dessus de l'air, par conséquent la vitesse du son dans l'hélium est supérieure à celle de l'air.

Par exemple, la vitesse du son dans un air sec ($M=28.964$ g/mol) à zéro degré Celsius est de **331.3 m/s**. À cette température, pour l'hélium ($M=4.003$ g/mol) la vitesse du son est de **891.2 m/s**.

Tableau I.8 : Propriétés physiques de l'hélium

Numéro atomique	2
Masse molaire (g/mol)	4.0026
Masse volumique (kg/m ³)	0.00017846
Température de fusion (K)	0.95
Température d'ébullitions (K)	4.25
Structure électronique	K ²
Configuration électronique	1s ²
Rayon atomique	31pm
Température critique (°C)	-267.95
Pression critique (bar)	2.275

I.4. Localisation de l'hélium [16-20]

I.4.1 Provenance de l'hélium

L'hélium n'est pas aussi abondant sur terre : l'atmosphère n'en contient que 0,0005%.

Il peut être retrouvé dans les gisements de gaz naturel en raison de la désintégration radioactive de l'Uranium et du Thorium dans la croûte terrestre, dans ce cas l'hélium peut s'accumuler à l'intérieur de la terre avec le gaz naturel où il est extrait par processus cryogénique, environ 80 à 90% de la production mondiale d'hélium provient de cette technique.

La Tanzanie pourrait devenir un nouvel acteur du marché de l'hélium, après la récente découverte d'un énorme gisement naturel de ce gaz noble estimé à 1,5 milliard de m³, soit l'équivalent de la demande mondiale pendant sept (07) ans.

Autres origines :

- La fusion des isotopes d'hydrogène.
- La transformation spontanée des noyaux d'atomes instables (radioactivité alpha).
- La plupart de l'hélium dans l'univers se trouve dans les étoiles et dans les planètes.

I.4.2. Utilisation et particularité de l'hélium

L'hélium est utilisé sous ses deux formes : liquide et gazeuse. Sous forme de gaz, l'hélium est principalement utilisé dans l'industrie électronique.

L'hélium est un gaz neutre, c'est cette caractéristique qui intéresse les fabricants. Ininflammable, il ne réagit avec aucun autre corps. C'est une sorte de gaz protecteur qui permet de créer une atmosphère neutre dans le processus de fabrication, lors de soudures.

À l'état liquide, l'hélium a des propriétés stupéfiantes. Il est utilisé pour atteindre de très basses températures (se liquéfie à $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$). Il est ainsi un élément essentiel dans l'imagerie médicale.

Sans hélium, il n'y aurait pas autant d'IRM, surtout que la demande dans ce secteur (comme dans celui de l'électronique), ne fait que croître.

Il sert par ailleurs dans le domaine spatial, pour refroidir les lanceurs de satellites, et dans l'automobile pour la production d'airbags.

Les deux isotopes de l'hélium les plus connus sont :

^4He (2 protons et 2 neutrons) qui est le plus abondant sur terre. Utilisé en :

- En médecine pour scanner les corps humains.
- Gaz de flottabilité pour gonfler les ballons et les dirigeables. (Pour des raisons de sécurité, 20% d'Oxygène y sont ajoutés : en effet, respirer une grande quantité de ce gaz peut être dangereux. De plus, l'addition de l'oxygène permet de rendre les ballons plus sûrs.
- L'hélium liquide peut être utilisé pour refroidir les supraconducteurs, qui à son tour est refroidi avec l'azote liquide (moins cher). Ainsi, il est utilisé dans des études scientifiques.
- Sa luminosité dépend de la tension d'électricité et du diamètre de l'ampoule. Contrairement au Néon et au Xénon, l'Hélium peut briller à distance du fil du générateur.
- Sous forme de plasma, l'hélium peut former des composés extrêmement instables avec l' H_2 et ils forment même des substances spéciales comme des réseaux piégeant des molécules.
- Mélange hélium-oxygène comme gaz respiratoire (médecine et plongée).

^3He (2 protons et 1 neutron). Cet isotope est parfait pour mener des réactions de fusion avec les isotopes de l'Hydrogène mais malheureusement il est très rare sur terre car il disparaît immédiatement dans l'atmosphère (il est présent dans la lune où il n'y a pas d'atmosphère). Ce processus de fusion peut aider l'humanité à remplacer le combustible fossile.

Tableau I.9 : Propriété des isotopes stables de l'hélium

Propriétés	^4He	^3He
Température d'ébullition (K)	4.2	3.2
Température critique (K)	5.2	3.32
Pression critique (bar)	2.23	1.16
Enthalpie d'évaporation massique à T_{eb} (kJ/kg)	21	8,44
Masse volumique du liquide à T_{eb} et à P_{atm} (kg/m^3)	125	58
Viscosité du gaz à T_{eb} (pa.s). 10^{-6}	1,241	1,0
Conductivité thermique du gaz (300K, 1atm) (W/m. K).	0,152	*
Conductivité thermique du liquide (4,2K, 1atm) (W/m. K).	0,018	*
Chaleur latente de vaporisation (kJ/kg)	20,42	*

Enfin l'hélium possède des propriétés très intéressantes et uniques parmi tous les éléments. A basse température ($T = 4,2 \text{ K}$), l'hélium devient le liquide le plus léger dont la densité est près de 10 fois inférieure à celle de l'eau ($d = 0,125 \text{ kg/m}^3$) et pour maintenir une température aussi basse, l'hélium liquide est stocké dans des DEWARS cryogéniques qui sont également refroidis à l'extérieur avec de l'azote.

A noter qu'il existe une 2^{ème} forme de l'hélium liquide obtenu à $T = 2,17 \text{ K}$.

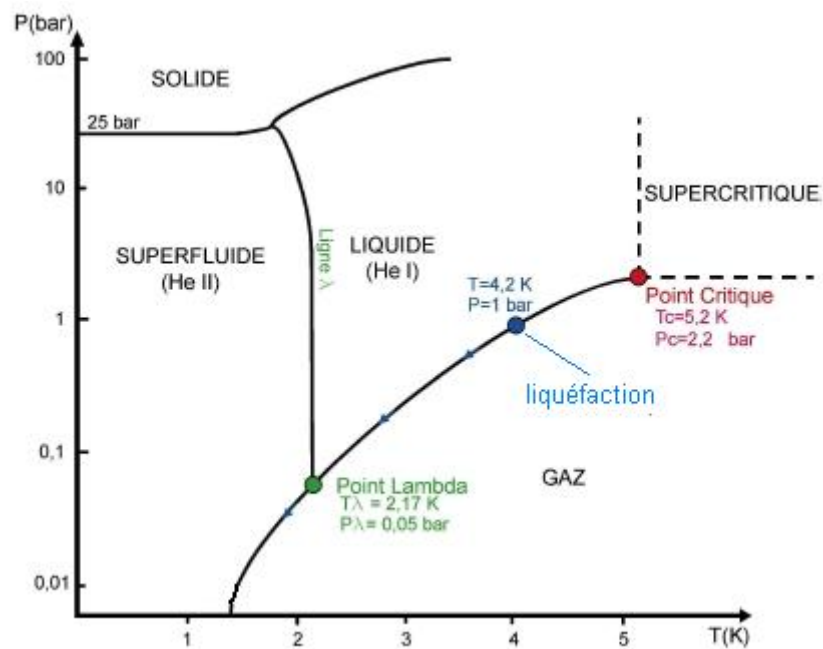


Figure I.1 : Diagramme Pression-Température des phases de l'hélium

Si l'hélium est refroidi davantage (en réduisant la pression dans les vases de stockage) le liquide finira par atteindre le point lambda λ ($T = 2,17 \text{ K}$), d'où la 2^{ème} forme liquide de l'hélium.

- Le liquide cesse de bouillir et commence à présenter des propriétés complètement différentes, à de telles températures, la conductivité de l'hélium liquide augmente si bien qu'elle devient ainsi plus élevée que celle du Cuivre (Cu) et de l'Argent (Ag) (C'est pourquoi le liquide ne bout pas, car la chaleur se répand immédiatement et uniformément dans tout le matériau).
- L'Hélium devient un superfluide. Cette superfluidité de l'Hélium liquide a été la 1^{ère} découverte en 1958.

I.4.3. Particularité de l'hélium

Un élément aussi simple qui à l'état liquide est la matière la plus froide sur terre, possède des propriétés surprenantes et est irremplaçable. Il peut avoir des propriétés uniques de superfluidité à des températures extrêmement basses.

L'hélium est le seul élément à ne pas posséder un point triple ce qui le rend très spécial.

I.5. Les principaux producteurs de gaz industriels [21-24]

Les acteurs prédominants du marché mondial du gaz industriel sont : Air Products, Linde, Air liquide et Praxair.

I.5.1. Air Products

Air Products and Chemicals, est un groupe industriel américain qui a été fondé en 1940, spécialiste des gaz industriels et médicaux. Son siège se trouve aux États-Unis.

Air Products possède des employés issus de divers horizons créant des solutions innovantes qui profitent à l'environnement, améliorent la durabilité et relèvent les défis auxquels sont confrontés les clients, les communautés et le monde.

Ils produisent et livrent des gaz industriels et médicaux, leurs effectifs sont de 20000 avec un chiffre d'affaire de 10,180 milliards de dollars. Il est l'un des principaux fournisseurs mondiaux de gaz industriels depuis plus de 75 ans. Son cœur de métier, les gaz industriels, fournit des gaz atmosphériques et de procédé ainsi que des équipements connexes aux marchés de fabrication dans plusieurs secteurs.

I.5.2. Linde AG

Linde est un groupe international allemand créé en 1878 par Carl Von Linde et ses associés connu par son nom officiel Linde AG. Spécialisé dans les domaines Gaz et Ingénierie, dont le siège est à Munich (en Allemagne). Linde est souvent mis en parallèle avec Air liquide avec un effectif de 63487 et un chiffre d'affaire de 16,655 milliards de dollars, parce qu'ils sont respectivement le 2^{ème} et le 1^{er} acteur du marché des gaz industriels et sont tous deux basés en Europe.

Cependant le duo Linde-Praxair de la même famille compte 80 000 salariés, et affiche un chiffre d'affaires de 24 milliards d'euros, voulant occuper la 1^{ère} place et détrôner Air Liquide avec un chiffre d'affaires de 20 milliards d'euros.

I.5.3. Air Liquide

Est un groupe industriel français créé en 1902, spécialiste des gaz industriels, la santé, l'environnement et la recherche. Il est présent dans quatre-vingts (80) pays à travers le monde.

Premier groupe mondial dans le secteur avec un chiffre d'affaire qui dépasse 20 milliards de dollars avec un effectif de 68000, son principal concurrent reste Linde, puis viennent Praxair et Air Products.

I.5.4. Praxair

Créée en 1907 par son fondateur Carl Von Linde qui produit et distribue des gaz purs, utilisés dans les processus de diverses industries. Praxair est présente dans 30 pays et possède un chiffre d'affaire similaire à Air Products, depuis près d'une décennie.

I.5.5. L'entreprise nationale Sonatrach

Le groupe américain leader mondial dans les gaz industriels (Air Products) et le géant algérien de l'énergie ont conclu deux accords fin 2018, pour un montant global estimé à 100 millions de dollars. Les deux contrats, concerneront la coentreprise algérienne Helios (Arzew), détenue à 51 % par Sonatrach et à 49 % par Air Products. Pour la production de l'hélium en Algérie et la construction de deux unités de séparation des gaz de l'air.

Air Products sera en charge du design et de la construction, Helios sera par la suite propriétaire et en charge des opérations. Ces projets de production des gaz industriels avec un partenaire de renommé, permettront de mieux valoriser nos ressources et sécuriser nos besoins en gaz industriels et ainsi renforcer la position de l'Algérie comme un producteur de référence à un niveau international, et d'offrir sur le marché algérien des gaz à des prix compétitifs tout en réduisant les importations.

I.5.6. La centrale à oxygène de l'entreprise nationale SIDER EL HADJAR-Annaba

La centrale à oxygène est considérée comme étant le poumon du complexe sidérurgique SIDER [EL HADJAR], elle se charge de produire et de stocker l'azote, l'oxygène et l'argon sous forme gazeuse et liquide. Ces gaz sont par la suite distribués aux unités de production pour être utilisé majoritairement dans les processus de fabrication de l'acier ou dans le but d'être commercialisé.

Tableau I.10 : Capacité de production de la centrale à oxygène de l'entreprise SIDER EL HADJAR-Annaba (2018-2019)

Gaz/Liquide	Production	stockage
Oxygène gaz (m ³ /Jours)	250999	180000
Azote gaz (m ³ /Jours)	191673	108000
Oxygène liquide (l/H)	625	-
Azote liquide (l/H)	417	-
Argon liquide (l/H)	150	-

Chapitre II. PROCÉDES DE LIQUEFACTION DES GAZ ET CYCLES THERMODYNAMIQUES ASSOCIÉS

II.1. Généralités sur la liquéfaction des gaz

Toute substance peut se trouver alternativement dans chacun de ces états (solide-liquide-gaz) selon les niveaux de température et les pressions auxquelles elle est soumise (Fig. II.1).

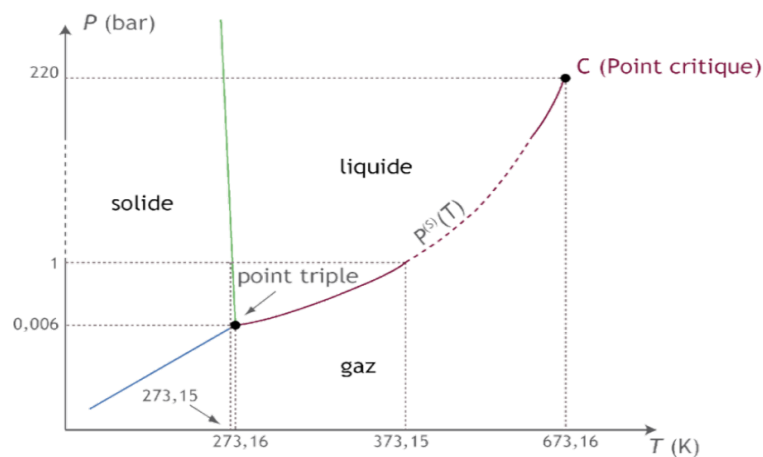


Figure II.1: Diagramme Pression-Température de l'eau

La liquéfaction est un changement de la phase gazeuse vers la phase liquide, elle est réalisée par de divers procédés cryogéniques. La façon de liquéfier un gaz qui a une température critique supérieure à la température ambiante est d'augmenter sa pression jusqu'à atteindre les conditions de saturation à l'état liquide. Pour de nombreux gaz dont $T_{cr} < T_0$ température ambiante, aucune condensation ne sera possible sans abaisser sa température en dessous de cette valeur même si l'on augmente la pression du gaz de travail à des pressions infinies. Pour ces gaz, il faudrait donc faire appel à des procédés industriels d'abaissement de la température par une utilisation simultanée de la compression et de la détente [25-26].

Les cycles de réfrigération et de liquéfaction cryogéniques mettent en jeu des combinaisons de compressions isothermes, de refroidissements, et de détente isenthalpique et adiabatique des fluides. On distingue quatre (04) grandes familles de procédés thermodynamiques cryogéniques :

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

II.2. Les cycles de base pour la liquéfaction des gaz

II.2.1. Cycle idéal de liquéfaction

C'est un cycle parfait pour transformer une quantité de gaz entièrement en liquide (Fig. II.2).

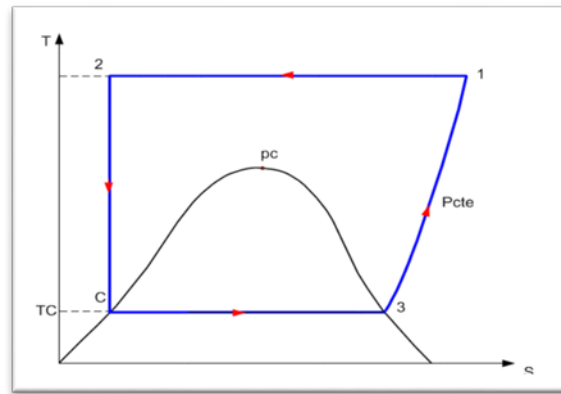


Figure II.2 : Cycle idéal pour la liquéfaction d'un gaz

Evolutions thermodynamiques du cycle idéal

1-2 : Compression isotherme

2-C : Détente isentropique

C-3 : Évaporation isotherme et isobare

3-1 : Chauffage isobare

La liquéfaction peut être imaginée en inversant le sens des transformations thermodynamiques du cycle (Fig. II.3).

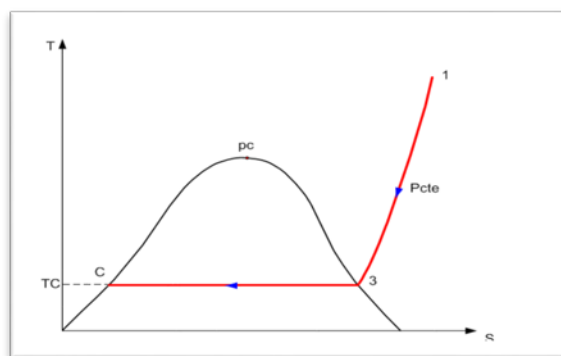


Figure II.3 : Transformations thermodynamiques inverses de liquéfaction d'un gaz

Evolutions thermodynamiques inverses :

1-3 : Refroidissement isobare

3-c : Condensation isotherme et isobare

II.2.2. Cycle théorique de Brayton inverse

Le cycle de Brayton inverse (Fig. II.4) réalise un effet frigorifique tout en produisant un travail. Un gaz est comprimé (1-2), refroidi (2-3), détendu (3-4) et réchauffé à son retour dans l'échangeur (4-1). La température à la fin de la détente étant basse, ce gaz peut être utilisé pour refroidir une enceinte, soit par contact direct, soit par l'intermédiaire d'un échangeur [26-29].

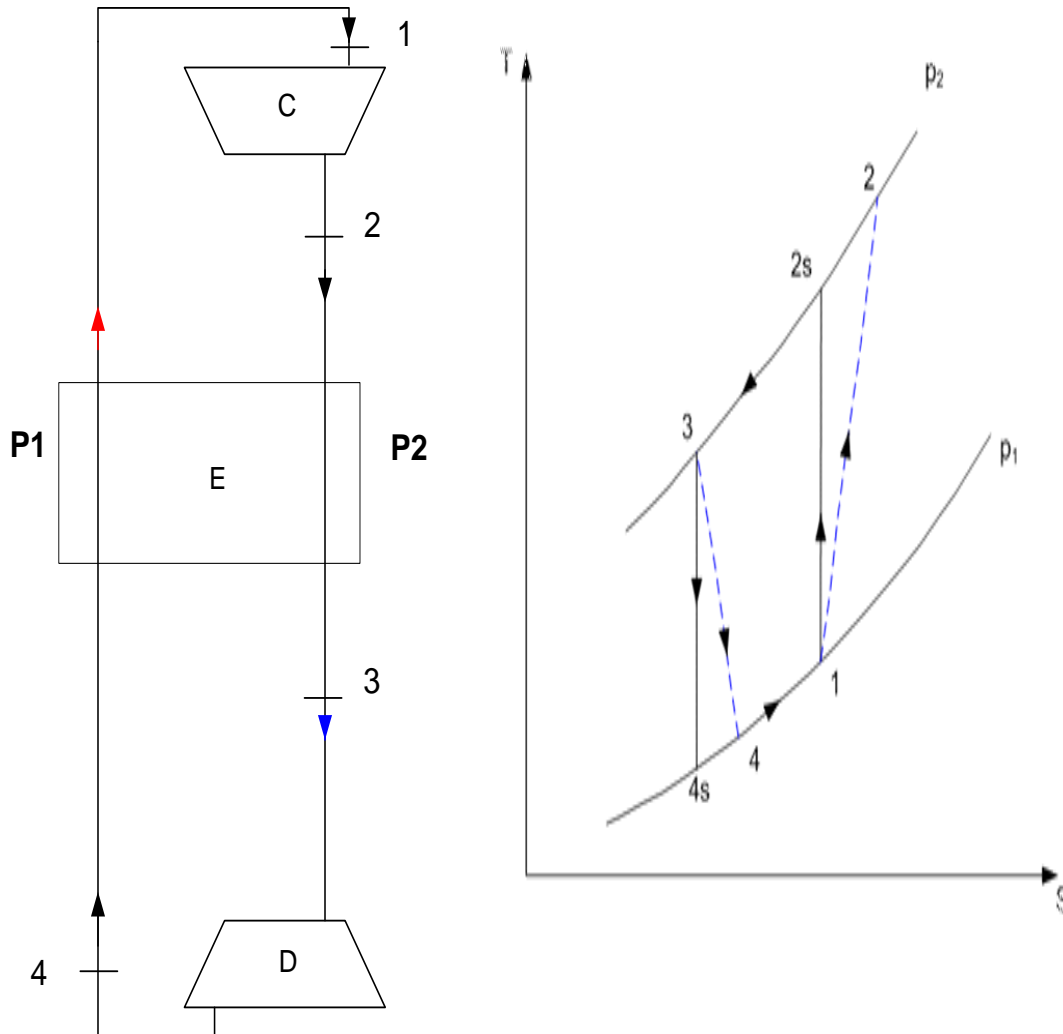


Figure II.4 : Schéma du procédé et cycle de Brayton inverse associé au processus

II.2.3. Cycle à étranglement simple ou cycle de LINDE

Ce cycle réel a été inventé par l'allemand LINDE vers la fin du 17^{ém} siècle. Il repose sur le principe de faire chuter la température d'un gaz grâce à un échangeur de chaleur et à une valve d'étranglement après sa compression isotherme (Fig. II.5).

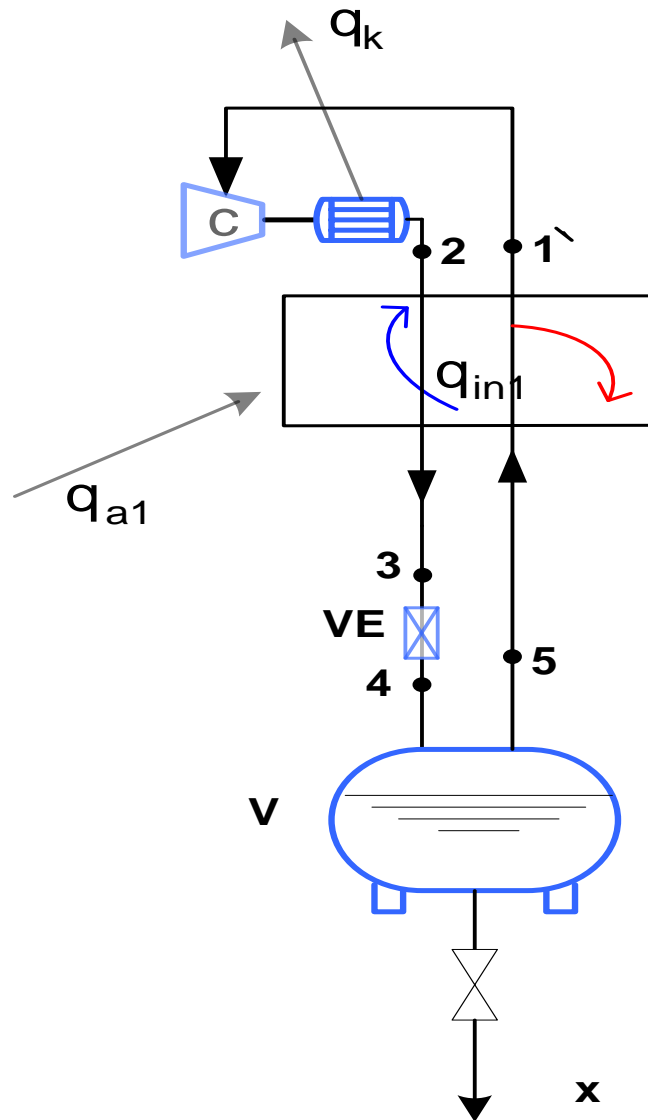


Figure II.5 : Schéma du cycle à étranglement simple de Linde

L'étranglement du gaz à travers la valve provoquera sa détente isenthalpique, il s'accompagne d'un refroidissement brusque c'est l'effet de Joule Thomson.

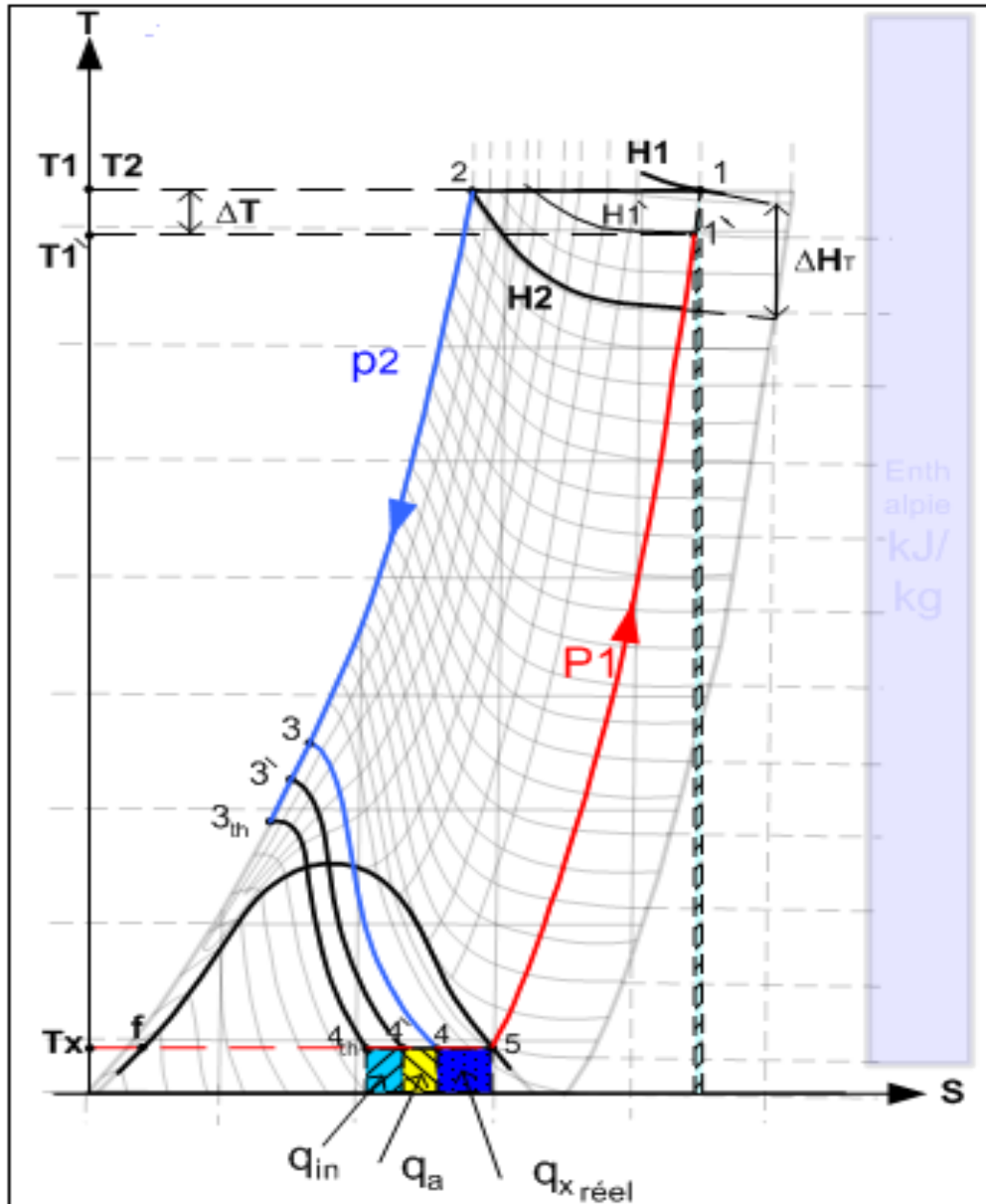


Figure II.6: Diagramme du cycle à étranglement simple (E.S) de Linde

Evolutions thermodynamiques du cycle à E.S

1-2 : Compression isotherme du gaz de travail.

2-3 : Refroidissement isobare.

3-4 : Détente isenthalpique.

5-1 : Réchauffement isobare d'une quantité $(1-x)$ du gaz de travail.

q_{in} : Pertes de l'échangeur.

q_a : Apport de chaleur du milieu extérieur.

ΔH_T : Coefficient d'étranglement isothermique.

T_x : Température de condensation du gaz de travail.

La quantité de liquide produite sera caractérisée par un coefficient de liquéfaction :

$$x = \frac{\Delta H_T - (q_{in} + q_a)}{H_1 - H_f - q_{in}}$$

Rendement du cycle à E.S

- Pour la liquéfaction de l'air ($T_{éb} = -194,3^\circ\text{C}$), le rendement de ce cycle est égal à 5%
- Pour la liquéfaction de l'hélium ($T_{éb} = -268,93^\circ\text{C}$), ce cycle est irréalisable.

II.2.4. Le cycle à étranglement avec refroidissement préalable (E.S+R.P)

Le refroidissement préalable s'effectue par un ou des cycles extérieurs (un ou plusieurs étages de R.P), pour faire circuler un ou des fluide(s) réfrigérant(s) dans l'installation. Le liquide réfrigérant rentre en contact avec le gaz de travail sans être mélangé par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur (E.C).

Le fluide réfrigérant fera chuter la température du gaz de travail en utilisant son énergie dégagée lors du changement d'état ou en le faisant passer à travers l'échangeur où il effectuera un échange à contre courant avec le gaz de travail à refroidir (Fig. II.7).

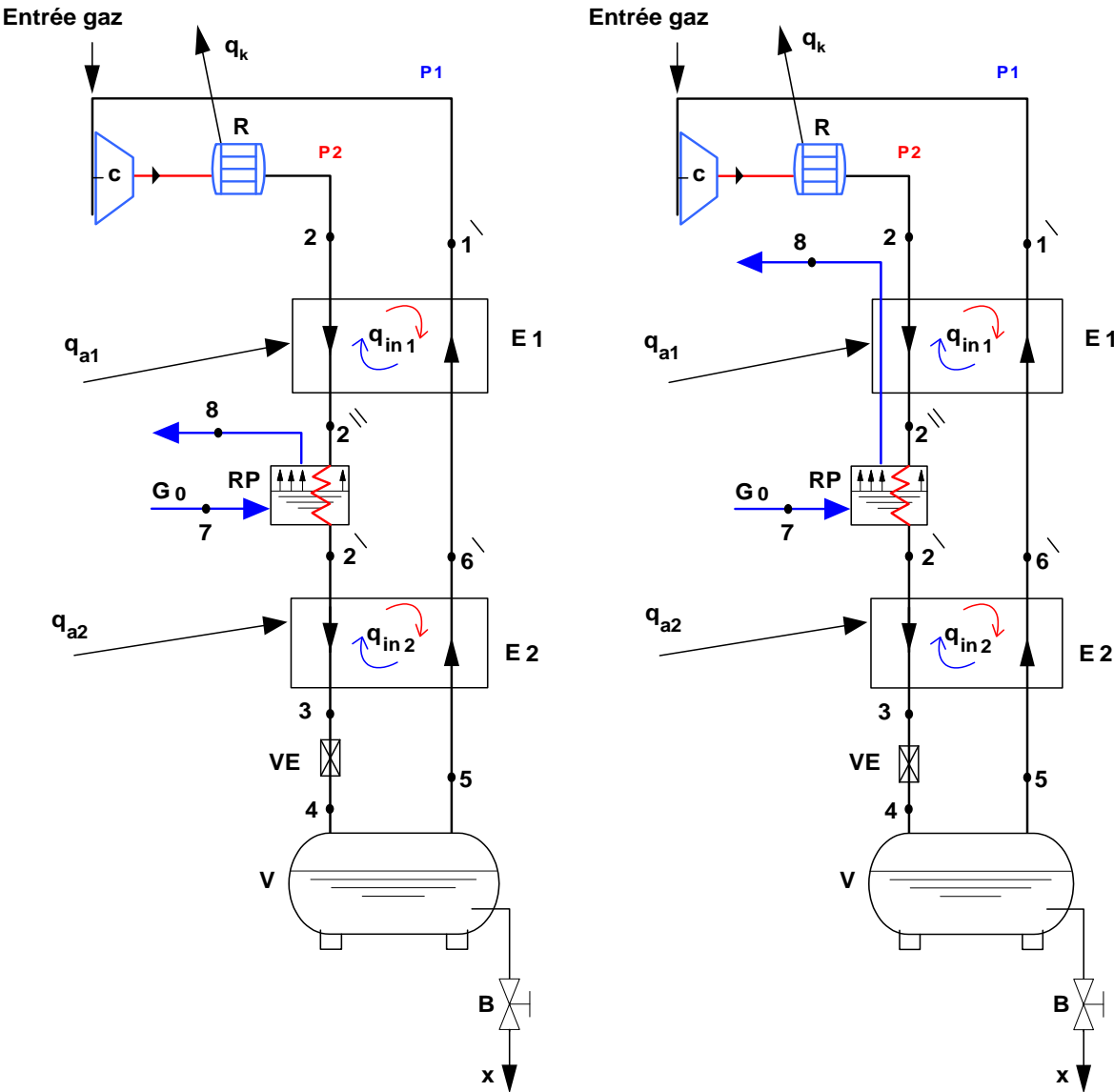


Figure II.7 : Schémas des cycles à étranglement E.S à un seul étage de R.P

La quantité de liquide produite sera :

$$x = \frac{\Delta H_{T2'} - (q_{in2} + q_{a2})}{H_g - H_f - q_{in2}}$$

Rendement du cycle E.S+R.P

- Pour la liquéfaction de l'air ($T_{éb} = -194,3^\circ\text{C}$), le rendement de ce cycle est égal à 15%.
- Pour la liquéfaction de l'hélium ($T_{éb} = -268,93^\circ\text{C}$), le rendement de ce cycle fonctionnant avec deux étages de R.P est égal à 7,7%.

II.2.5. Le cycle combiné ou cycle de CLAUDE

Pour la liquéfaction des gaz permanents et le cas de l'hélium, la réalisation d'un cycle combiné permettra d'obtenir des températures qui avoisinent le Zéro (0) absolu.

Le processus associé à ce cycle combine à la fois la détente isenthalpique (valve d'étranglement) et la détente isentropique (détendeur adiabatique).

Le détendeur peut être branché de différentes manières :

- Au niveau initial de température en fin de compression (Fig. II.9).
- Au niveau intermédiaire de température durant l'écoulement « Aller » du gaz à travers l'échangeur (Fig. II.10).
- Au niveau inférieur de température (Fig. II.11).

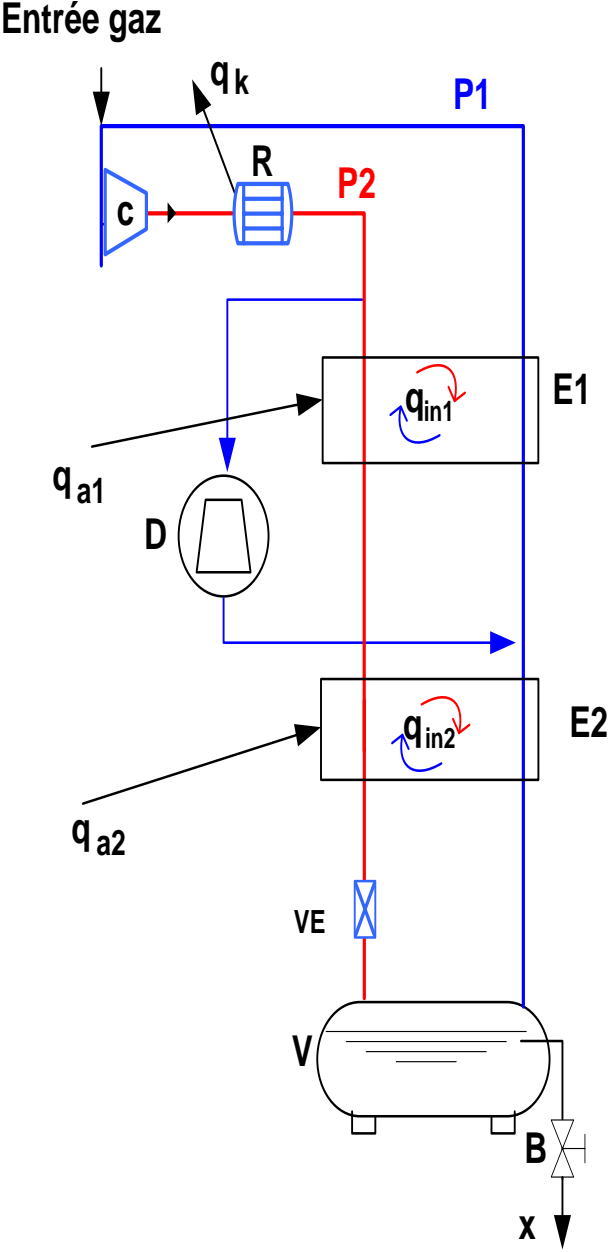


Figure II.9 : Schéma du processus combiné avec branchement du détendeur au niveau initial de température.

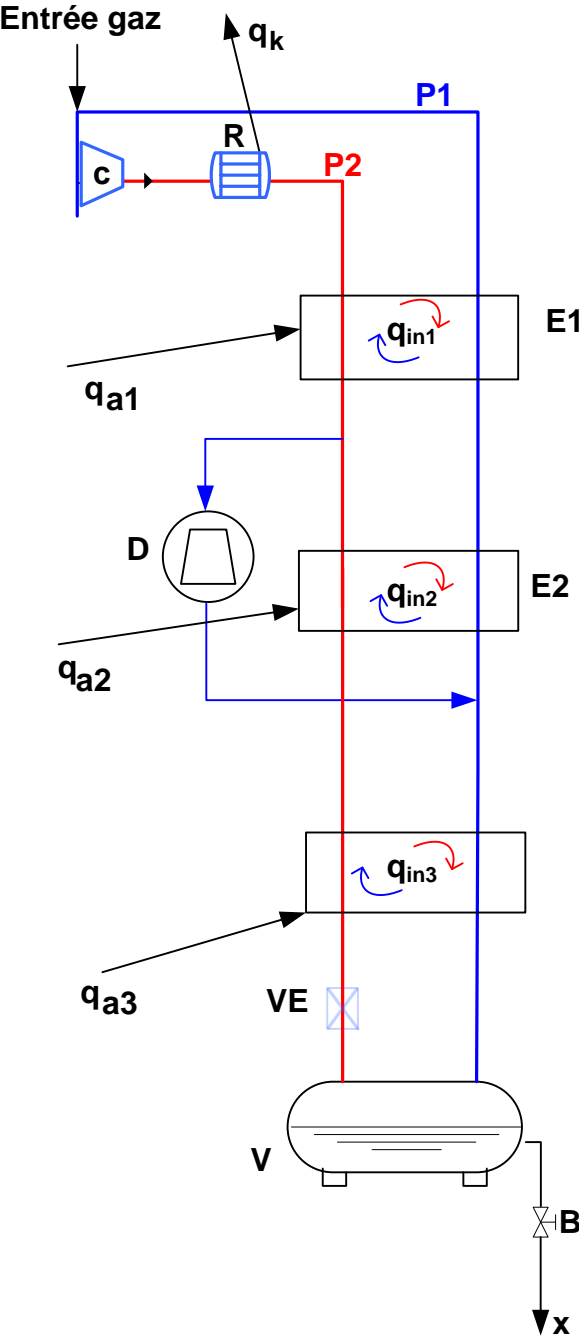


Figure II.10: Schéma du processus combiné avec branchement du détendeur au niveau intermédiaire de température.

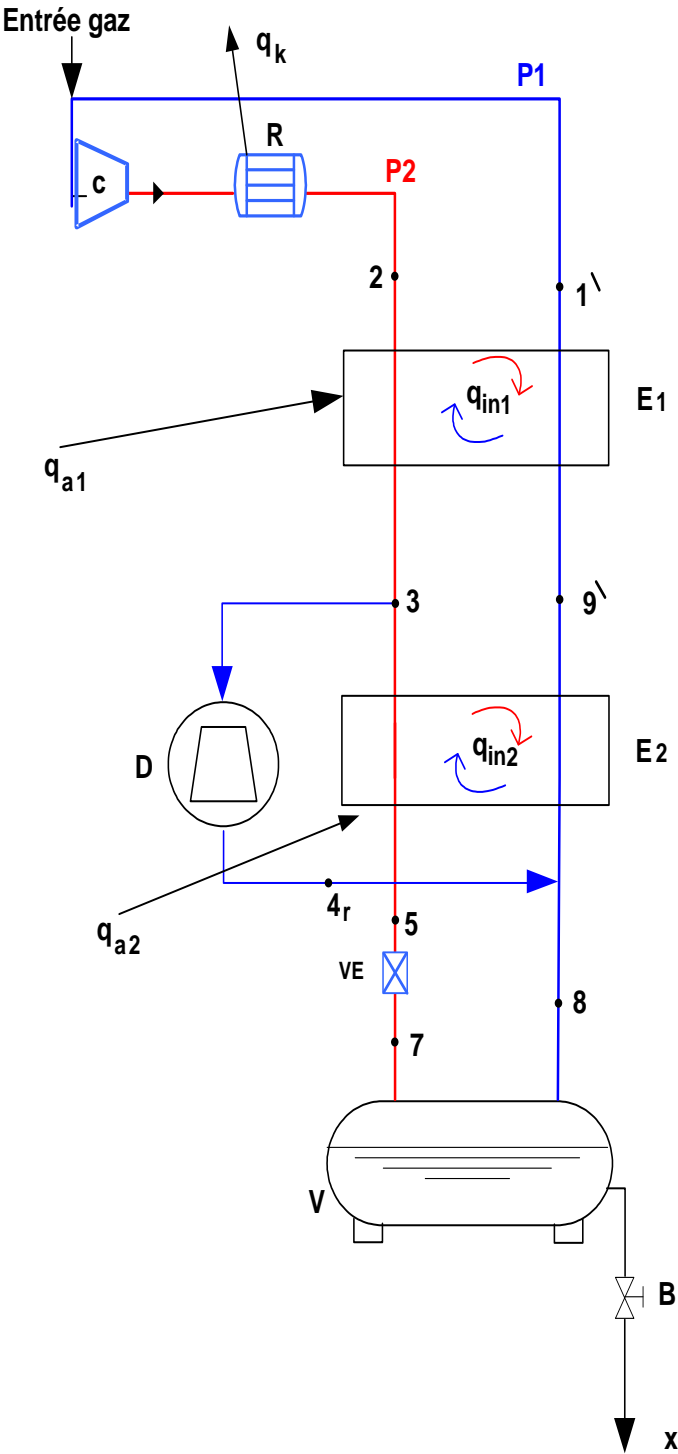


Figure II.11: Schéma du processus combiné avec branchement du détendeur au niveau inférieur de température.

Evolutions thermodynamiques du cycle combiné

- 1-2 : Compression isotherme du gaz de travail.
- 2-3 : Refroidissement isobare.
- 3-4_s : Détente isentropique dans le détendeur (théorique).
- 3-4_r : Détente réel dans le détendeur (avec création d'entropie).
- 3-5 : Refroidissement isobare d'une quantité (1-x-G) du gaz de travail.
- 5-7 : Détente isenthalpique.
- 8-1 : Réchauffement isobare du gaz de travail.
- q_{in1}, q_{in2} : Imperfections des échangeurs.
- q_{a1}, q_{a2}: Apport de chaleur du milieu extérieur.

La quantité de liquide produite sera :

$$x = \frac{(1 - G) (\Delta H_{T2} - \sum q_2)}{(h_g - h_f - q_{in2})}$$

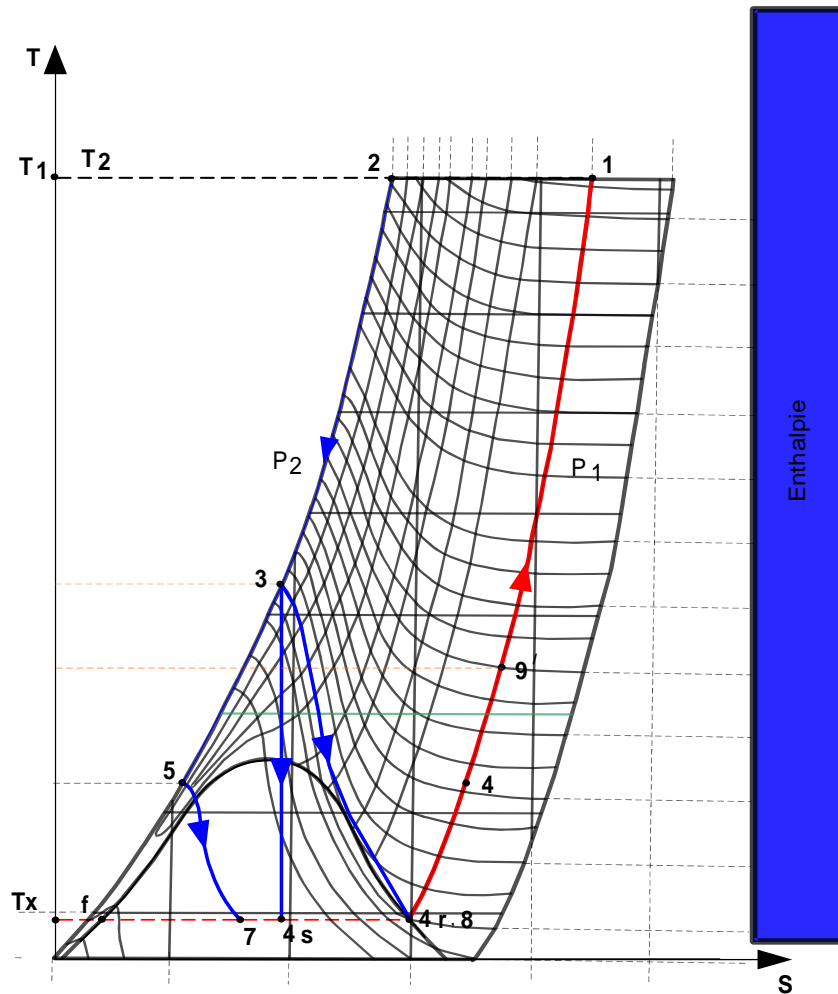


Figure II.12: Schéma du cycle combiné associé au processus avec branchement du détendeur au niveau inférieur de température.

Rendement du cycle combiné

- Pour la liquéfaction de l'air ($T_{éb} = -194,3^{\circ}\text{C}$), le rendement de ce cycle est égal à 25%.
- Pour la liquéfaction de l'hélium ($T_{éb} = -268,93^{\circ}\text{C}$), le rendement de ce cycle est égal à 44%.

II.2.6. Cycle en cascade

Il est possible d'utiliser un processus de réfrigération en cascade, où les fluides subissent des changements d'états (liquide - gaz) provoqués par des échanges thermiques dans des échangeurs de chaleurs (Fig. II.13).

La particularité de ce processus est que deux (02) circuits sont couplés thermiquement par leurs évapo-condenseur.

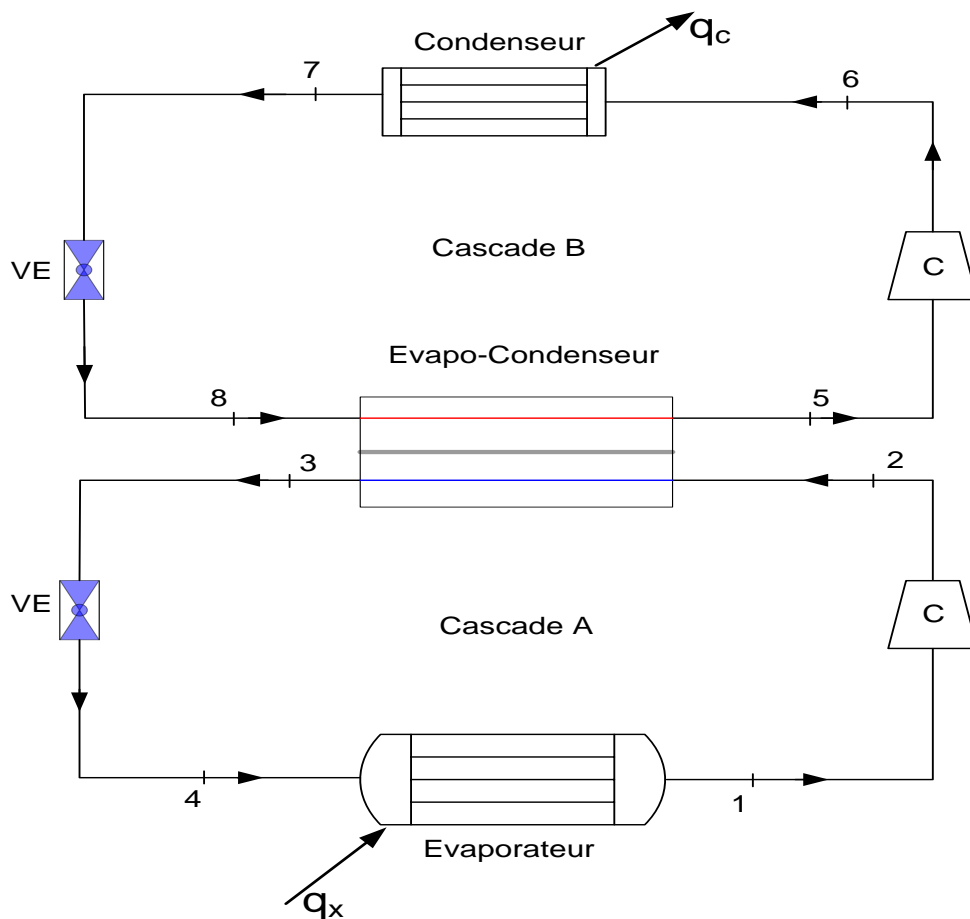


Figure II.13: Schéma du procédé de liquéfaction en cascade

Evolutions thermodynamiques du cycle en cascade

Cascade A

1-2 : Compression isentropique dans un compresseur

2-3 : Désurchauffe isobare+condensation isotherme et isobare dans un évapo-condenseur

3-4 : Détente isenthalpique dans une V.E

4-1 : Evaporation isotherme et isobare dans un évaporateur avec une source chaude q_x entrante.

Cascade B

5-6 : Compression isentropique dans un compresseur

6-7 : Désurchauffe isobare+condensation isotherme et isobare dans un condenseur avec q_c sortant

7-8 : Détente isenthalpique dans une V.E

8-5 : Evaporation isotherme et isobare dans un évapo-condenseur

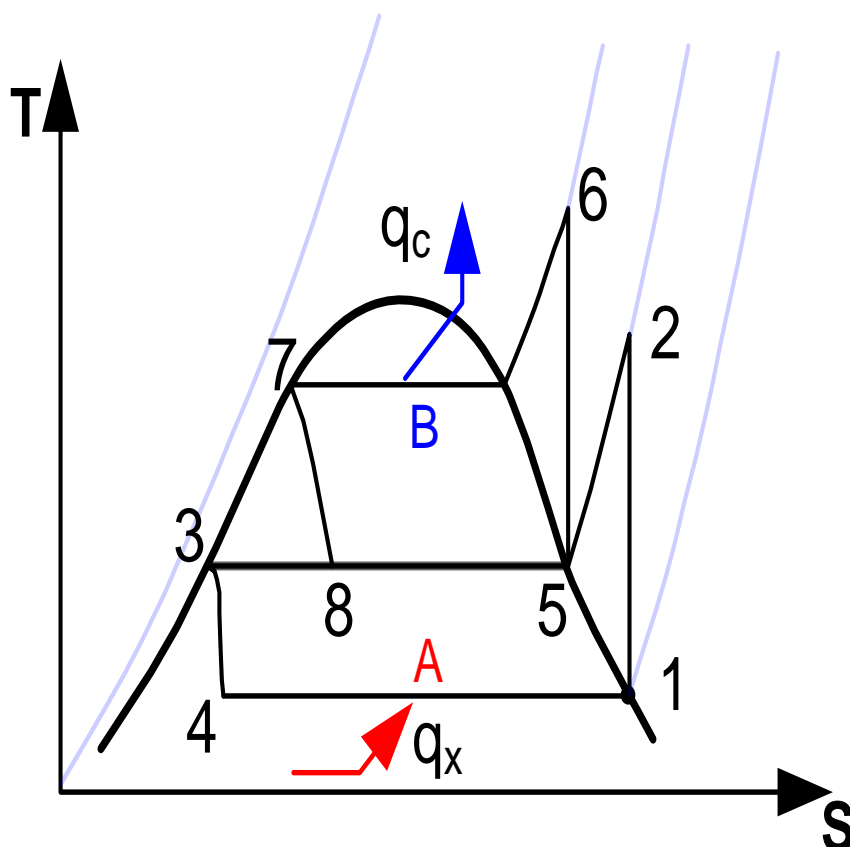


Figure II.14: Cycle associé au processus de liquéfaction en cascade

Chapitre III. ETUDE THERMODYNAMIQUE DES INSTALLATIONS ET CYCLES CRYOGENIQUES DE LIQUEFACTION DE L'HELIUM

III.1. Cycle à étranglement simple de LINDE ou cycle E.S

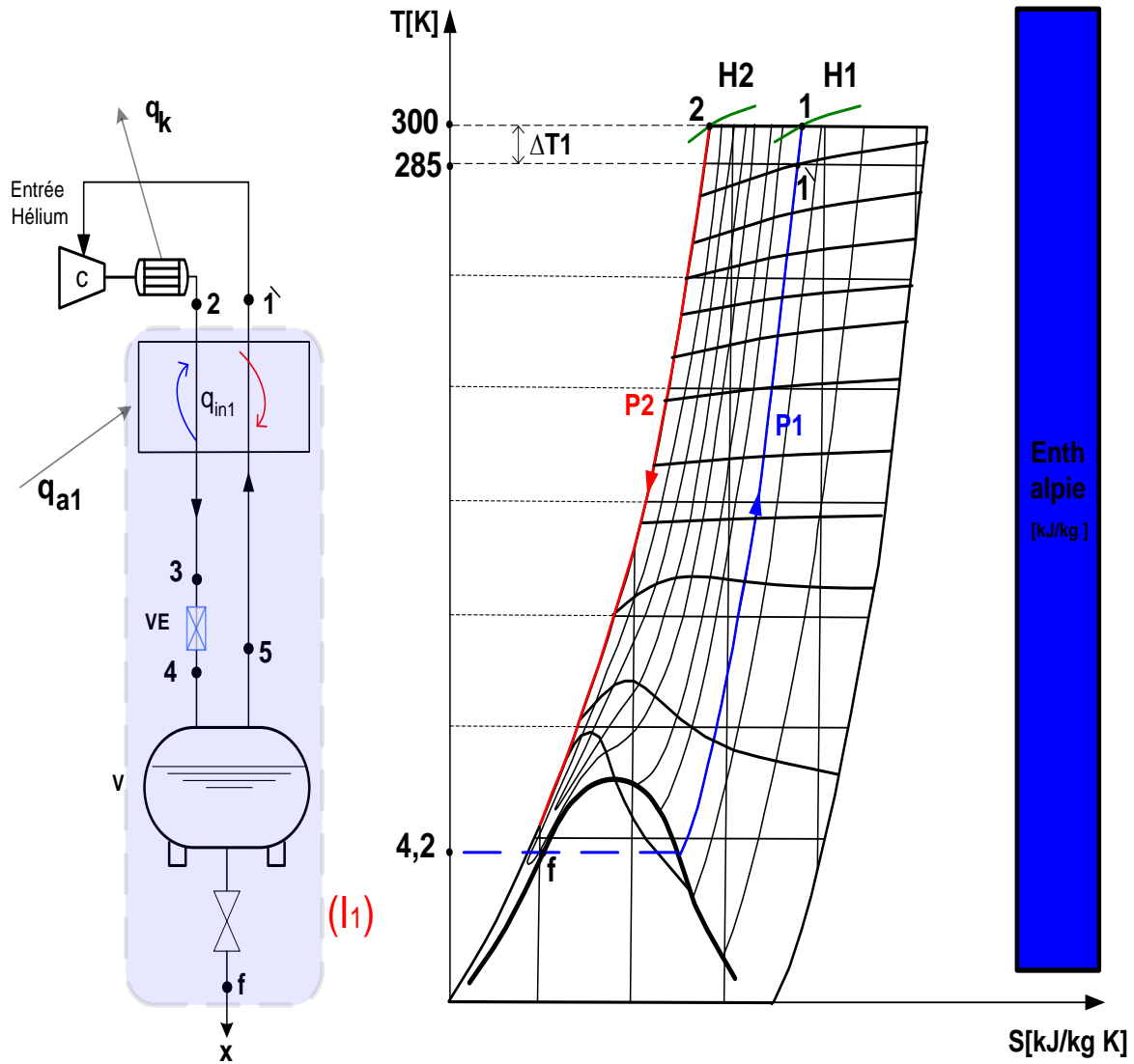


Figure III.1: Schéma du processus de liquéfaction à étranglement simple et cycle associé au processus à E.S

L'équation du bilan du contour (II) représenté dans le schéma (Fig. III.1) nous permet de déterminer la quantité de gaz liquéfié (x) : $\dot{S} = \dot{E}$

$$h_2 + q_{a1} = x h_f + (1 - x)h_1'$$

$$x = \frac{h_1' - h_2 - q_{a1}}{(h_1' - h_f)}$$

$$q_{in1} = h_1 - h_1' \implies h_1' = h_1 - q_{in1}$$

Chapitre III. Etude thermodynamique des installations et cycles cryogéniques de liquéfaction de l'Hélium

Notre équation du bilan s'écrit alors :

$$x = \frac{h_1 - h_2 - q_{in1} - q_{a1}}{(h_1 - h_f - q_{in1})}$$

$$x = \frac{\Delta H_{T1} - q_{in1} - q_{a1}}{(h_1 - h_f - q_{in1})}$$

$$x = \frac{\Delta H_{T1} - \sum q_1}{(h_1 - h_f - q_{in1})}$$

Calcul de l'effet isothermique d'étranglement ΔH_{T1}

Hypothèses :

On assume que les apports de chaleur au niveau de chaque étage sont de l'ordre de 3% de la valeur de l'effet isothermique d'étranglement et que les imperfections des échangeurs de chaleur sont de l'ordre de 5% de la température du bout chaud de l'échangeur de chaleur considéré.

On opte au départ pour une pression optimale en fin de compression de 20 atm.

Pour des pressions $P_1 = 1\text{atm}$ et $P_2 = 20\text{atm}$:

$$\Delta H_{T1} = h_1 - h_2$$

$$\Delta H_{T1} = 1574 - 1580 = -6 \text{ kJ/kg} < 0$$

Calcul du coefficient de liquéfaction

$$q_{in1} = C_p(T_1 - T_1') = 5.93 \text{ (15)}$$

$$q_{in1} = 77,895 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{a1} = -0,18 \text{ kJ/kg} = 3\% \Delta H_T \\ \Delta T_1 = 15\text{K} = 5\% T_1 \end{array} \right.$$

$$x = \frac{\Delta H_{T1} - \sum q_1}{(h_1 - h_f - q_{in1})} = \frac{-6 - (-0.18 - 77,895)}{(1574 - 9,901 - 77,895)}$$

$$x = -0,05633$$

Le coefficient de liquéfaction (x) obtenu est négatif alors qu'il doit être compris entre 0 et 1, donc ce cycle à E.S ne pourra pas être réalisé pour liquéfier l'hélium.

Calcul de l'effet isothermique d'étranglement ΔH_{T2}

Pour des pressions : $P_1 = 1 \text{ atm}$ et $P_2 = 20 \text{ atm}$:

$$\Delta H_{T2} = h_6 - h_2'$$

$$\Delta H_{T2} = 431 - 435,7 = -4,7 \text{ kJ/kg} < 0$$

Calcul du coefficient de liquéfaction

$$q_{in2} = C_p(T_6 - T_6') = (5,195)(4) = 20,78 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{in2} = 20,78 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{a2} = -0,141 \text{ kJ/kg} \\ \Delta T_2 = 4 \text{ K} \end{array} \right.$$

$$x = \frac{\Delta H_{T2} - \sum q_2}{h_6 - h_f - q_{in2}} = \frac{-4,7 - (-0,141 + 20,78)}{(431 - 9,901 - 20,78)}$$

$$x = -0.0633$$

Le coefficient de liquéfaction (x) bien qu'exprimé au niveau de l'étage inférieur, il demeure toujours négatif.

Donc le cycle à étranglement avec 1 étage de R.P fonctionnant avec du N_2 liquide à 80K ne peut pas être réalisé pour liquéfier l'hélium.

III.3 Cycle à étranglement simple avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote à 80K et de l'azote sous vide à 65 K

On ajoute un deuxième étage de refroidissement préalable au processus précédent comportant de l'azote sous vide à 65K (Fig. III.3).

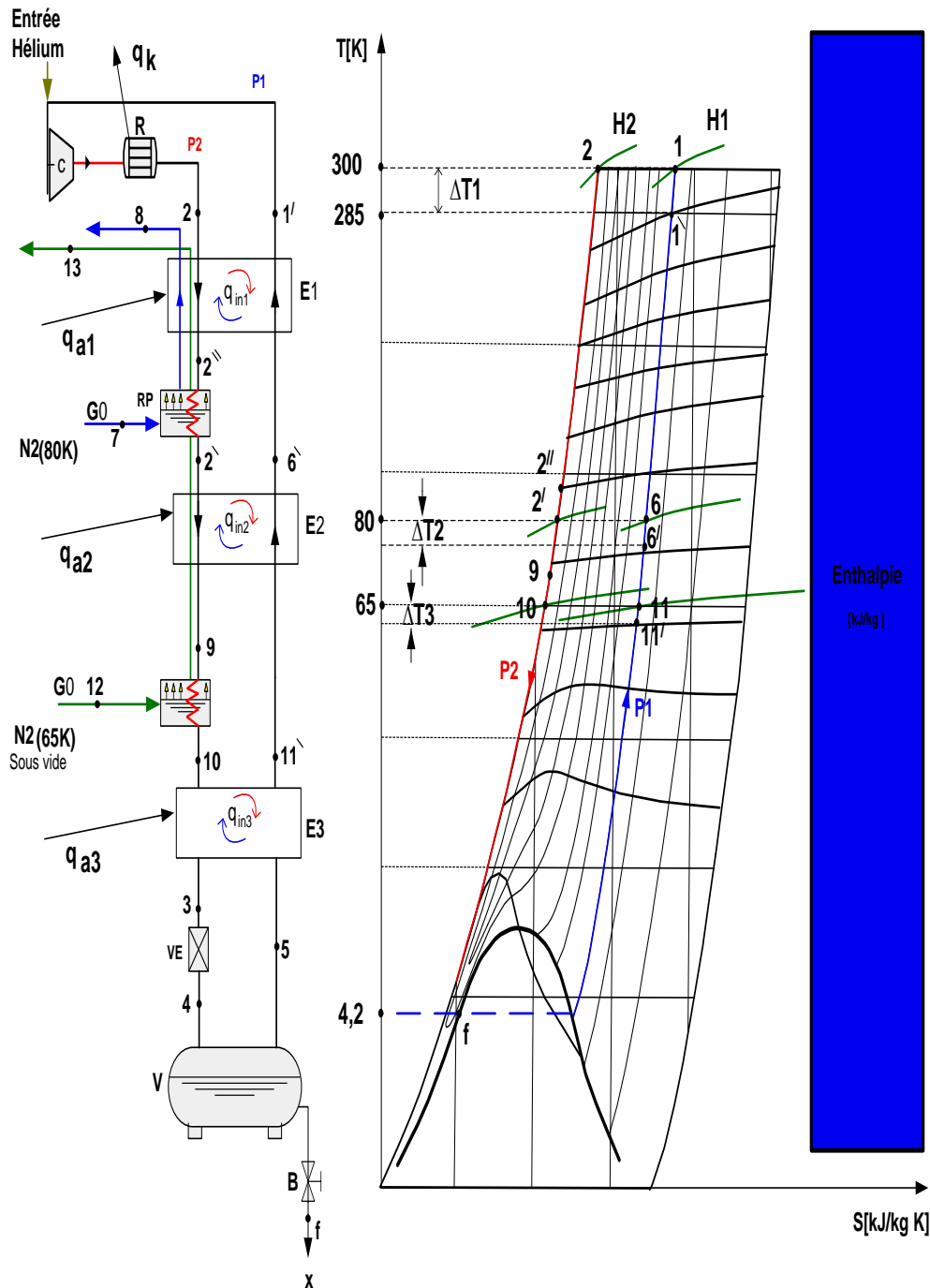


Figure III.3 : Schéma du processus de liquéfaction et cycle à étranglement avec deux étages de R.P : azote liquide saturé à 80K et azote sous vide à 65K

Calcul de l'effet isothermique d'étranglement ΔH_{T3}

Pour des pressions $P_1 = 1\text{atm}$ et $P_2 = 20\text{atm}$:

$$\Delta H_{T3} = h_{11} - h_{10}$$

$$\Delta H_{T3} = 353 - 356,85 = -3,85 \text{ kJ/kg} < 0$$

Calcul du coefficient de liquéfaction

$$q_{in3} = C_p(T_{11} - T_{11}') = 5,197(3,25)$$

$$q_{in3} = 16,89 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{a3} = -0,1155 \text{ kJ/kg} \\ \Delta T_3 = 3,25 \text{ K} \end{array} \right.$$

$$x = \frac{\Delta H_{T3} - \sum q_3}{h_{11} - h_f - q_{in3}} = \frac{-3,85 - (-0,1155 + 16,89)}{(353 - 9,901 - 16,89)}$$

$$x = -0.0632$$

Le cycle à étranglement avec 2 étages de R.P fonctionnant avec du N_2 liquide à la pression atmosphérique et à 80 K et du N_2 sous vide à 65 K ne permet pas de liquéfier l'hélium.

L'hélium a une température de saturation très basse 4,2 K, on utilisera l'hydrogène liquide à 20 K comme gaz de refroidissement préalable en plus de l'azote liquide saturé à 80K à la pression atmosphérique (Fig. III.4).

III.4. Cycle à étranglement simple avec deux étages de R.P fonctionnant avec de l'azote à 80 K et de l'hydrogène à 20 K

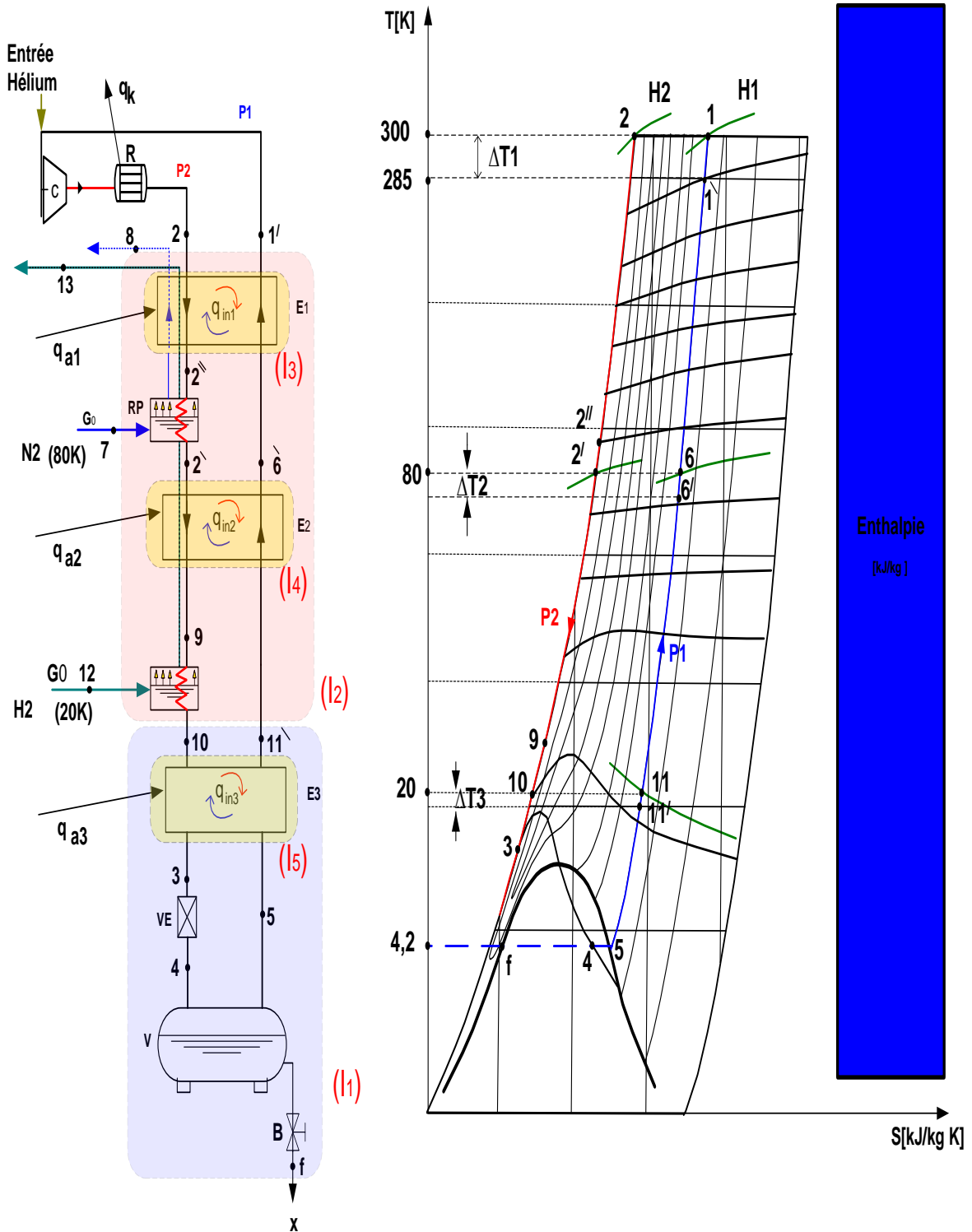


Figure III.4 : Schéma du processus de liquéfaction et cycle à étranglement avec deux étages de R.P : azote liquide saturé à 80K et hydrogène liquide à 20K

III.4.1. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique avec $P_2=1\text{MPa}$

Calcul de l'effet isothermique d'étranglement ΔH_{T3}

$$\Delta H_{T3} = h_{11} - h_{10}$$

$$\Delta H_{T3} = 118,6 - 114,2 = 4,4 \text{ kJ/kg}$$

Calcul du coefficient de liquéfaction

Bilan énergétique du contour (II) :

$$q_{in3} = C_p \Delta T_3 = C_p (T_{11} - T_{11}') = 5,25 \text{ (1)}$$

$$q_{in3} = 5,25 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{a3} = 0,132 \text{ kJ/kg} \\ \Delta T_3 = 1 \text{ K} \end{array} \right.$$

$$x = \frac{\Delta H_{T3} - \sum q_3}{h_{11} - h_f - q_{in3}} = \frac{4,4 - (0,132 + 5,25)}{(118,6 - 9,901 - 5,25)}$$

$$x = -0,0095 < 0$$

On obtient un coefficient de liquéfaction $x < 0$

III.4.2. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique avec $P_2=1.5\text{MPa}$

Calcul de l'effet isothermique d'étranglement ΔH_{T3}

$$\Delta H_{T3} = h_{11} - h_{10}$$

$$\Delta H_{T3} = 118,6 - 112,2 = 6,4 \text{ kJ/kg}$$

Calcul du coefficient de liquéfaction

$$q_{in3} = C_p (T_{11} - T_{11}') = 5,25 \text{ (1)}$$

$$q_{in3} = 5,25 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{a3} = 0,192 \text{ kJ/kg} \\ \Delta T_3 = 1 \text{ K} \end{array} \right.$$

$$x = \frac{\Delta H_{T3} - \sum q_3}{h_{11} - h_f - q_{in3}} = \frac{6,4 - (0,192 + 5,25)}{(118,6 - 9,901 - 5,25)} = 0,009261$$

$$x = 0,9261\%$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{a1} = -0,12 \text{ kJ/kg} \\ q_{a2} = -0,105 \text{ kJ/kg} \\ q_{a3} = 0,192 \text{ kJ/kg} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} q_{in1} = 77,895 \text{ kJ/kg} \\ q_{in2} = 20,780 \text{ kJ/kg} \\ q_{in3} = 5,250 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

Détermination de la quantité de chaleur totale $q_{0 \text{ totale}}$ extraite du gaz de travail par R.P

Bilan énergétique du contour (I2): $\dot{S} = \dot{E}$

$$h_2 + G_{O_{N_2}} h_7 + q_{a1} + q_{a2} + G_{O_{H_2}} h_{12} + (1-x)h_{11}' = G_{O_{N_2}} h_8 + G_{O_{H_2}} h_{13} + h_{10} + (1-x)h_1'$$

$$q_{0 \text{ totale}} = q_{O_{N_2}} + q_{O_{H_2}} = (G_{O_{N_2}} h_8 - G_{O_{N_2}} h_7) + (G_{O_{H_2}} h_{13} - G_{O_{H_2}} h_{12})$$

$$q_{0 \text{ totale}} = (h_2 - h_{10})(1-x)(h_{11}' - h_1') + q_{a1} + q_{a2}$$

$$q_{0 \text{ totale}} = (1578 - 112,2) + (1 - 0,009261)(113,35 - 1496,105) - 0,12 - 0,105$$

$$q_{0 \text{ totale}} = \mathbf{95,6257 \text{ kJ/kg}}$$

Calcul de h_2'' à la sortie de l'échangeur E1

Bilan énergétique du contour (I3) : $\dot{S} = \dot{E}$

$$h_2 + q_{a1} + (1-x)h_6' = h_1'' + (1-x)h_1'$$

$$h_2'' = h_2 + q_{a1} + (1-x)(h_6' - h_1')$$

$$h_2'' = 1578 - 0,12 + (1 - 0,009261)(410,22 - 1496,105)$$

$$h_2'' = \mathbf{502,06 \text{ kJ/kg}} \quad \Longrightarrow \quad T_2'' = \mathbf{93 \text{ K}}$$

Calcul de h_9 à la sortie de l'échangeur E2

Bilan énergétique du contour (I4): $\dot{S} = \dot{E}$

$$h_2' + q_{a2} + (1-x)h_{11}' = h_9 + (1-x)h_6'$$

$$h_9 = h_2' + q_{a2} + (1-x)(h_{11}' - h_6')$$

$$h_9 = 434,5 - 0,105 + (1 - 0,009261)(113,35 - 410,22)$$

$$h_9 = \mathbf{140,27 \text{ kJ/kg}} \quad \Longrightarrow \quad T_9 = \mathbf{24 \text{ K}}$$

Calcul de h_3 (détente isenthalpique)

$$h_3 = h_4 = x h_f + (1 - x)h_5$$

$$h_3 = h_4 = 0,009261(9,901) + (1 - 0,009261)30,691$$

$$h_3 = h_4 = 30,50 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad T_3 = 7,6 \text{ K}$$

Tableau III.1 : Points figuratifs du cycle à 2 étages de liquéfaction de l'hélium : R.P avec azote liquide à 80 K et R.P avec hydrogène liquide à 20 K ($P_2 = 15\text{atm}$).

Points	P [atm]	T [K]	H [kJ/kg]	S [kJ/kg K]
1	1	300	1574,000	31,610
1'	1	285	1496,105	31,340
2	15	300	1578,000	25,990
2''	15	93	502,066	19,891
2'	15	80	434,50	19,110
6	1	80	431,00	24,750
6'	1	76	410,22	24,470
9	15	24	140,274	12,645
10	15	20	112,20	11,570
11	1	20	118,60	17,520
11'	1	19	113,35	17,245
3	15	7,6	30,50	5,152
4	1	4,2	30,50	8,213
5	1	4,2	30,69	8,510
f	1	4,2	9,901	3,551

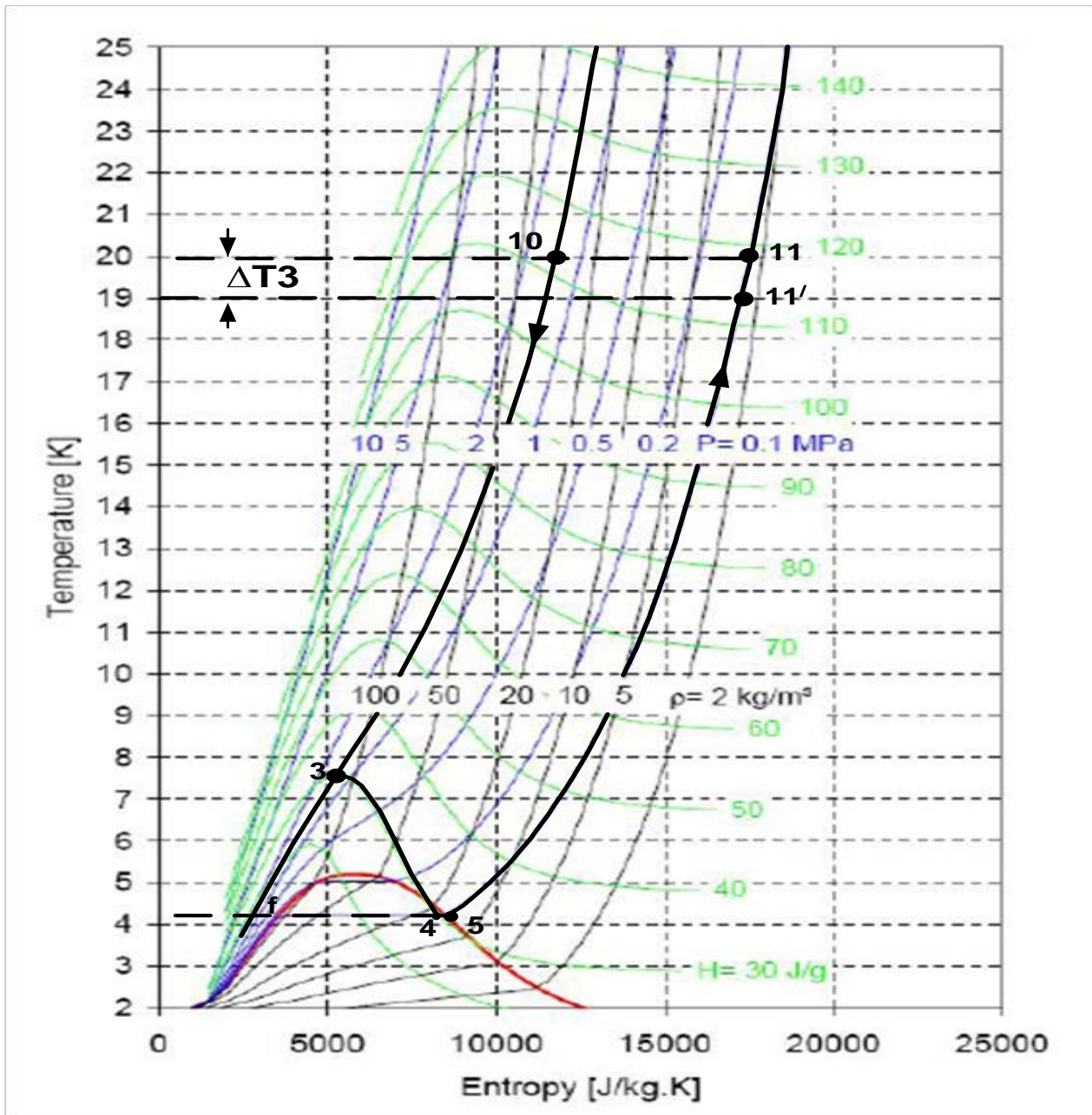


Figure III.5 : Cycle de liquéfaction de l'hélium en coordonnées T-S : R.P avec azote liquide saturé à 80 K et hydrogène liquide à 20 K ($P_2 = 15\text{atm}$).

Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique

Travail du compresseur :

$$W_k = \frac{rT_1 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\eta_k} = \frac{2,076 (300) \ln\left(\frac{15}{1}\right)}{0,65}$$

$$W_k = 2594,728716 \text{ kJ/kg}$$

Travail supplémentaire :

$$W_{\text{supp}} = \frac{q_0 \text{ totale}}{q_x \text{ supp}} = \frac{95,62569}{1,05}$$

$$W_{\text{supp}} = \mathbf{91,0720857 \text{ kJ/kg}}$$

Travail total fourni pour le fonctionnement de l'installation :

$$W_{\text{total}} = W_k + \beta W_{\text{supp}} = 2594,728716 + 1,2(91,0720857)$$

$$W_{\text{total}} = \mathbf{2704,015 \text{ kJ/kg}}$$

Travail spécifique :

$$W_o = \frac{W_{\text{total}}}{x} = \frac{2704,015219}{0,009261}$$

$$W_o = \mathbf{291978,75 \text{ kJ/kg}}$$

$$\text{Coefficient frigorifique réel : } \varepsilon_{\text{réel}} = \frac{q_x}{W_{\text{total}}}$$

$$q_x = x (h_1 - h_f) = 0,009261(1574 - 9,901)$$

$$q_x = \mathbf{14,4851 \text{ kJ/kg}}$$

$$\varepsilon_{\text{réel}} = \frac{14,4851}{2704,015219}$$

$$\varepsilon_{\text{réel}} = \mathbf{0,00536}$$

Coefficient frigorifique théorique :

$$\varepsilon_{\text{th}} = \frac{(h_1 - h_f)}{T_1(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)}$$

$$\varepsilon_{\text{th}} = \frac{1574 - 9,901}{300(31,61 - 3,551) - (1574 - 9,901)}$$

$$\varepsilon_{\text{th}} = \mathbf{0,2282}$$

Le rendement thermodynamique :

$$\eta = \frac{\varepsilon_{\text{réel}}}{\varepsilon_{\text{th}}} = \frac{0,005356885}{0,228215} = 0,0235$$

$$\eta = \mathbf{2,35\%}$$

III.4.3. Calcul des paramètres de l'installation avec $P_2 = 2\text{MPa}$

Calcul de l'effet isothermique d'étranglement ΔH_{T3}

$$\Delta H_{T3} = h_{11} - h_{10}$$

$$\Delta H_{T3} = 118,6 - 110,5 = \mathbf{8,1 \text{ kJ/kg} > 0}$$

Calcul du coefficient de liquéfaction

$$q_{in3} = C_p(T_{11} - T_{11}') = 5,25(1)$$

$$q_{in3} = 5,25 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{a3} = 0,243 \text{ kJ/kg} \\ \Delta T_3 = 1\text{K} \end{array} \right.$$

$$x = \frac{\Delta H_{T3} - \sum q_3}{h_{11} - h_f - q_{in3}} = \frac{8,1 - (0,243 + 5,25)}{(118,6 - 9,901 - 5,25)} = 0,0252$$

$$\mathbf{x = 2,52\%}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{a1} = -0,18 \text{ kJ/kg} \\ q_{a2} = -0,141 \text{ kJ/kg} \\ q_{a3} = 0,243 \text{ kJ/kg} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} q_{in1} = 77,895 \text{ kJ/kg} \\ q_{in2} = 20,780 \text{ kJ/kg} \\ q_{in3} = 5,250 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

Détermination de la quantité de chaleur totale $q_{0 \text{ totale}}$ extraite du gaz de travail par R.P

$$q_{0 \text{ totale}} = (h_2 - h_{10}) + (1 - x)(h_{11} - h_1') + q_{a1} + q_{a2}$$

$$q_{0 \text{ totale}} = (1580 - 110,5) + (1 - 0,0252)(113,35 - 1496,105) - 0,18 - 0,141$$

$$q_{0 \text{ totale}} = \mathbf{121,27 \text{ kJ/kg}}$$

Calcul de h_2'' à la sortie de l'échangeur E1

$$h_2'' = h_2 + q_{a1} + (1 - x)(h_6' - h_1')$$

$$h_2'' = 1580 - 0,18 + (1 - 0,0252)(410,22 - 1496,105)$$

$$\mathbf{h_2'' = 521,30 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad T_2'' = 96,365 \text{ K}}$$

Calcul de h_9 à la sortie de l'échangeur E2

$$h_9 = h_2' + q_{a2} + (1 - x)(h_{11}' - h_6')$$

Chapitre III. Etude thermodynamique des installations et cycles cryogéniques de liquéfaction de l'Hélium

$$h_9 = 435,7 - 0,141 + (1 - 0,0252)(113,35 - 410,22)$$

$$h_9 = 146,170124 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad T_9 = 26 \text{ K}$$

Calcul de h_3 (détente isenthalpique)

$$h_3 = h_4 = x h_f + (1 - x)h_5 = 0,0252 (9,901) + (1 - 0,0252) 30,691$$

$$h_3 = h_4 = 30,16709 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad T_3 = 7,34\text{K}$$

Tableau III.2 : Points figuratifs du cycle à 2 étages de liquéfaction de l'hélium : R.P avec azote liquide à 80 K et R.P avec hydrogène liquide à 20 K ($P_2=20\text{atm}$)

points	P [atm]	T [K]	H [kJ/kg]	S [kJ/kg K]
1	1	300	1574,000	31,610
1'	1	285	1496,105	31,340
2	20	300	1580,000	25,390
2''	20	96,37	521,299	19,480
2'	20	80	435,700	18,510
6	1	80	431,000	24,750
6'	1	76	410,220	24,470
9	20	26	146,170	12,430
10	20	20	110,500	10,230
11	1	20	118,600	17,520
11'	1	19	113,350	17,245
3	20	7,34	30,167	4,600
4	1	4,2	30,167	8,138
5	1	4,2	30,691	8,510
f	1	4,2	9,901	3,551

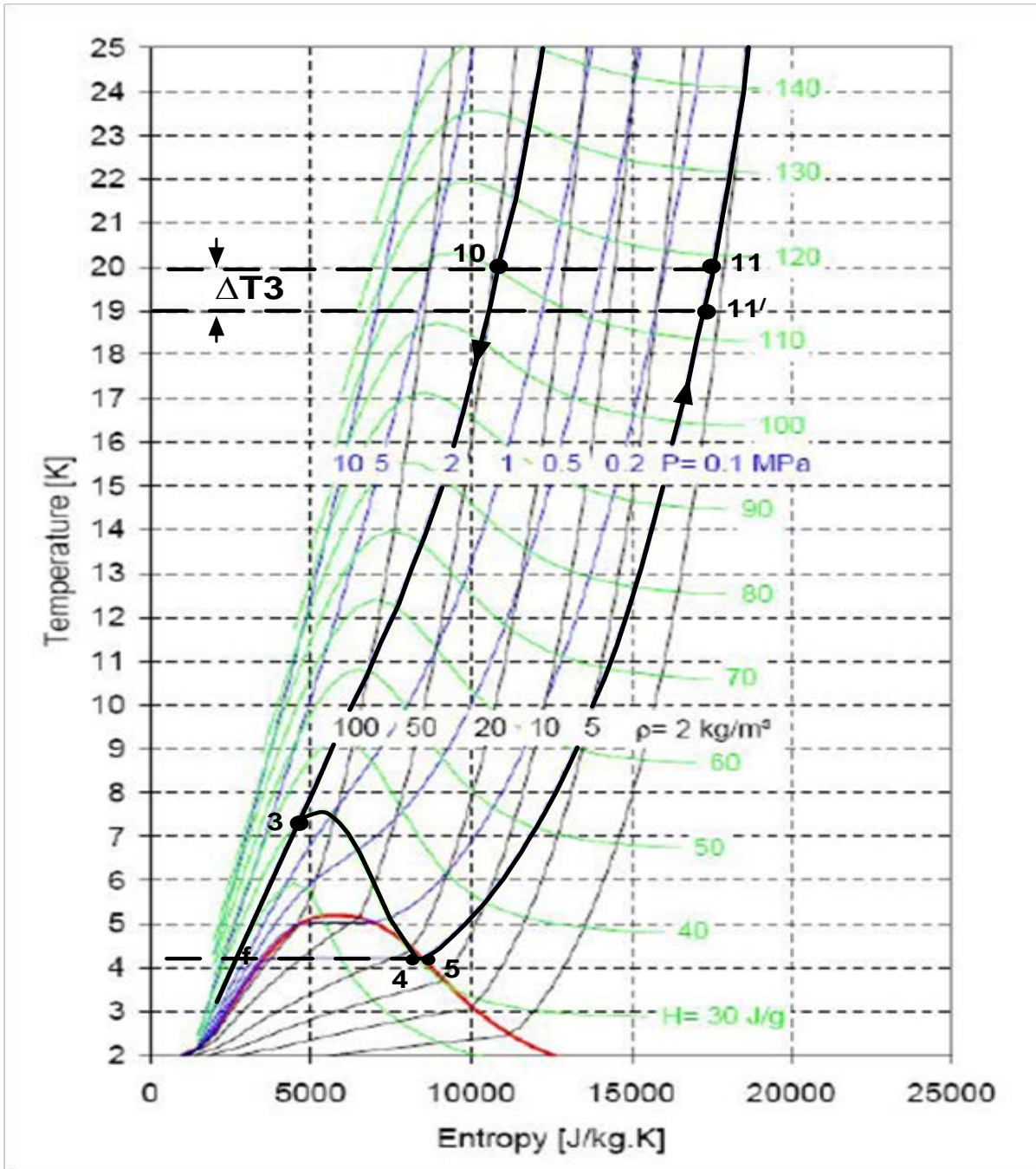


Figure III.6 : Cycle de liquéfaction de l'hélium en coordonnées T-S : R.P avec azote liquide à 80 K et hydrogène liquide à 20 K ($P_2 = 20 \text{ atm}$).

Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique

Travail du compresseur :

$$W_k = \frac{rT_1 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\eta_k} = \frac{2,076 (300) \ln\left(\frac{20}{1}\right)}{0,65}$$

$$W_k = 2870,37 \text{ kJ/kg}$$

Travail supplémentaire :

$$W_{\text{supp}} = \frac{q_0 \text{ totale}}{q_x \text{ supp}} = \frac{121,269426}{1,05}$$

$$W_{\text{supp}} = 115,49 \text{ kJ/kg}$$

Travail total fourni pour le fonctionnement de l'installation :

$$W_{\text{total}} = W_k + \beta W_{\text{supp}} = 2870,3724 + 1,2(115,4947)$$

$$W_{\text{total}} = 3008,96 \text{ kJ/kg}$$

Travail spécifique :

$$W_o = \frac{W_{\text{total}}}{x} = \frac{3008,96604}{0,0252}$$

$$W_o = 119403,41 \text{ kJ/kg}$$

Coefficient frigorifique réel : $\varepsilon_{\text{réel}} = \frac{q_x}{W_{\text{total}}}$

$$q_x = x (h_1 - h_f) = 0,0252(1574 - 9,901)$$

$$q_x = 39,42 \text{ kJ/kg}$$

$$\varepsilon_{\text{réel}} = \frac{39,41529}{3008,96604}$$

$$\varepsilon_{\text{réel}} = 0,0131$$

Coefficient frigorifique théorique :

$$\varepsilon_{\text{th}} = \frac{(h_1 - h_f)}{T_1(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)}$$

$$\varepsilon_{\text{th}} = \frac{1574 - 9,901}{300(31,61 - 3,551) - (1574 - 9,901)}$$

$$\varepsilon_{\text{th}} = 0,2282$$

Le rendement thermodynamique :

$$\eta = \frac{\varepsilon_{\text{réel}}}{\varepsilon_{\text{th}}} = \frac{0,0130992}{0,228215} = 0,05739$$

$$\eta = 5,74 \%$$

III.4.4. Calcul des paramètres de l'installation avec $P_2=2.5\text{MPa}$

Calcul de l'effet isothermique d'étranglement ΔH_{T3}

$$\Delta H_{T3} = h_{11} - h_{10}$$

$$\Delta H_{T3} = 118,6 - 109,3 = 9,3 \text{ kJ/kg}$$

Calcul du coefficient de liquéfaction

$$\begin{cases} q_{\text{in}3} = c_p(T_{11} - T_{11}') = 5,25(1) \\ q_{\text{in}3} = 5,25 \text{ kJ/kg} \end{cases} \quad \left\{ \begin{array}{l} q_{\text{a}3} = 0,279 \text{ kJ/kg} \\ \Delta T_3 = 1\text{K} \end{array} \right.$$

$$x = \frac{\Delta H_{T3} - \sum q_3}{h_{11} - h_F - q_{\text{in}3}} = \frac{9,3 - (0,279 + 5,25)}{(118,6 - 9,901 - 5,25)} = 0,0364527$$

$$x = 3,65\%$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{\text{a}1} = -0,21 \text{ kJ/kg} \\ q_{\text{a}2} = -0,177 \text{ kJ/kg} \\ q_{\text{a}3} = 0,279 \text{ kJ/kg} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} q_{\text{in}1} = 77,895 \text{ kJ/kg} \\ q_{\text{in}2} = 20,780 \text{ kJ/kg} \\ q_{\text{in}3} = 5,250 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

Détermination de la quantité de chaleur totale q_0 totale extraite du gaz de travail par R.P

$$q_0 \text{ totale} = (h_2 - h_{10}) + (1 - x)(h_{11} - h_1') + q_{\text{a}1} + q_{\text{a}2}$$

$$q_0 \text{ totale} = (1581 - 109,3) + (1 - 0,0364527)(113,35 - 1496,105) - 0,21 - 0,177$$

$$q_0 \text{ totale} = 138,96 \text{ kJ/kg}$$

Calcul de h_2'' à la sortie de l'échangeur E1

$$h_2'' = h_2 + q_{\text{a}1} + (1 - x)(h_6' - h_1')$$

Chapitre III. Etude thermodynamique des installations et cycles cryogéniques de liquéfaction de l'Hélium

$$h_2'' = 1581 - 0,21 + (1 - 0,0364527)(410,22 - 1496,105)$$

$$h_2'' = 534,48844 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad T_2'' = 98,626 \text{ K}$$

Calcul de h_9 à la sortie de l'échangeur E2

$$h_9 = h_2' + q_{a2} + (1 - x)(h_{11}' - h_6')$$

$$h_9 = 436,9 - 0,177 + (1 - 0,0364527)(113,35 - 410,22)$$

$$h_9 = 150,6747 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad T_9 = 26,9328 \text{ K}$$

Calcul de h_3 (détente isenthalpique)

$$h_3 = h_4 = x h_f + (1 - x)h_5$$

$$h_3 = h_4 = 0,0364527 (9,901) + (1 - 0,0364527)30,691$$

$$h_3 = h_4 = 29,9331 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad T_3 = 6,9 \text{ K}$$

Tableau III.3 : Points figuratifs du cycle à 2 étages de liquéfaction de l'hélium : R.P avec azote liquide à 80 K et R.P avec hydrogène liquide à 20 K ($P_2=25\text{atm}$)

points	P [atm]	T [K]	H [kJ/kg]	S [kJ/kg K]
1	1	300	1574,000	31,610
1'	1	285	1496,105	31,340
2	25	300	1581,000	24,930
2''	25	98,63	534,488	19,143
2'	25	80	436,900	18,050
6	1	80	431,000	24,750
6'	1	76	410,220	24,470
9	25	26,933	150,674	12,120
10	25	20	109,300	10,350
11	1	20	118,600	17,520
11'	1	19	113,350	17,245
3	25	6,9	29,933	4,1312
4	1	4,2	29,933	8,085
5	1	4,2	30,691	8,510
f	1	4,2	9,901	3,551

Travail supplémentaire :

$$W_{\text{supp}} = \frac{q_{0 \text{ totale}}}{q_{x \text{ supp}}} = \frac{138,963153}{1,05}$$

$$W_{\text{supp}} = 132,34 \text{ kJ/kg}$$

Travail total fourni pour le fonctionnement de l'installation :

$$W_{\text{total}} = W_k + \beta W_{\text{supp}} = 3084,17825 + 1,2 (132,34586)$$

$$W_{\text{total}} = 3242,99 \text{ kJ/kg}$$

Travail spécifique :

$$W_0 = \frac{W_{\text{total}}}{x} = \frac{3242,99328}{0,0364527}$$

$$W_0 = 88964,419 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Coefficient frigorifique réel : } \varepsilon_{\text{réel}} = \frac{q_x}{W_{\text{total}}}$$

$$q_x = x (h_1 - h_f) = 0,0364527(1574 - 9,901)$$

$$q_x = 57,01563 \text{ kJ/kg}$$

$$\varepsilon_{\text{réel}} = \frac{57,01563}{3242,99328}$$

$$\varepsilon_{\text{réel}} = 0,0176$$

Coefficient frigorifique théorique :

$$\varepsilon_{\text{th}} = \frac{(h_1 - h_f)}{T_1(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)}$$

$$\varepsilon_{\text{th}} = \frac{1574 - 9,901}{300(31,61 - 3,551) - (1574 - 9,901)}$$

$$\varepsilon_{\text{th}} = 0,2282$$

Le rendement thermodynamique :

$$\eta = \frac{\varepsilon_{\text{réel}}}{\varepsilon_{\text{th}}} = \frac{0,0175811}{0,228215}$$

$$\eta = 0,077 = 7,7\%$$

Tableau III.4 : Tableau récapitulatif des résultats des calculs des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique à 2 étages R.P avec azote liquide à 80 K et R.P avec hydrogène liquide à 20 K.

P_2 [atm]	W_k [kJ/kg]	X [%]	W_0 [kJ/kg]	q_0 [kJ/kg]	$\epsilon_{réel}$	η_{th} [%]
15	2594,73	0,93	291966,90	95,53	0,0053	2,35
20	2870,37	2,52	119403,41	121,27	0,0131	5,74
25	3084,18	3,65	88966,49	139,03	0,0176	7,70

III.4.5. Représentation graphique de l'évolution des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique à 2 étages

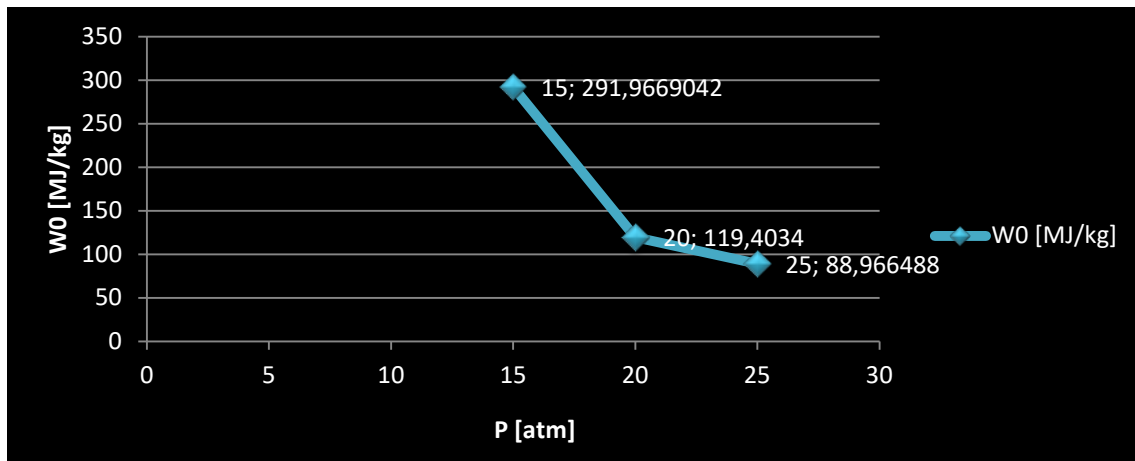


Figure III.8 : Evolution de la consommation d'énergie spécifique en fonction de P_2

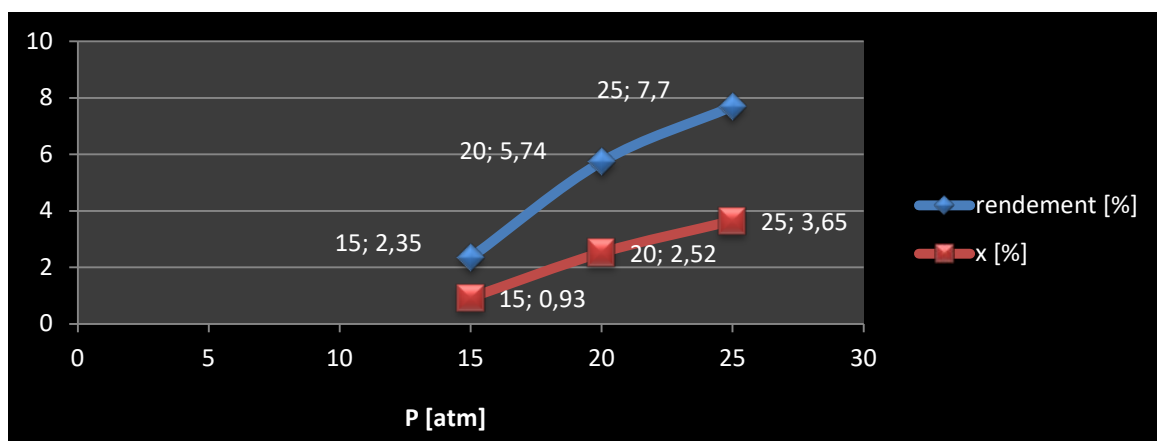


Figure III.9: Evolution du rendement thermodynamique et du coefficient de liquéfaction de l'hélium en fonction de la pression P_2

On remarque une augmentation du rendement en abaissant la température et en augmentant la pression de refoulement du compresseur.

III.5. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec deux étages de refroidissement préalable R.P utilisant de l'azote à 80K et de l'hydrogène à 20 K avec branchement du détendeur à $T=20K$

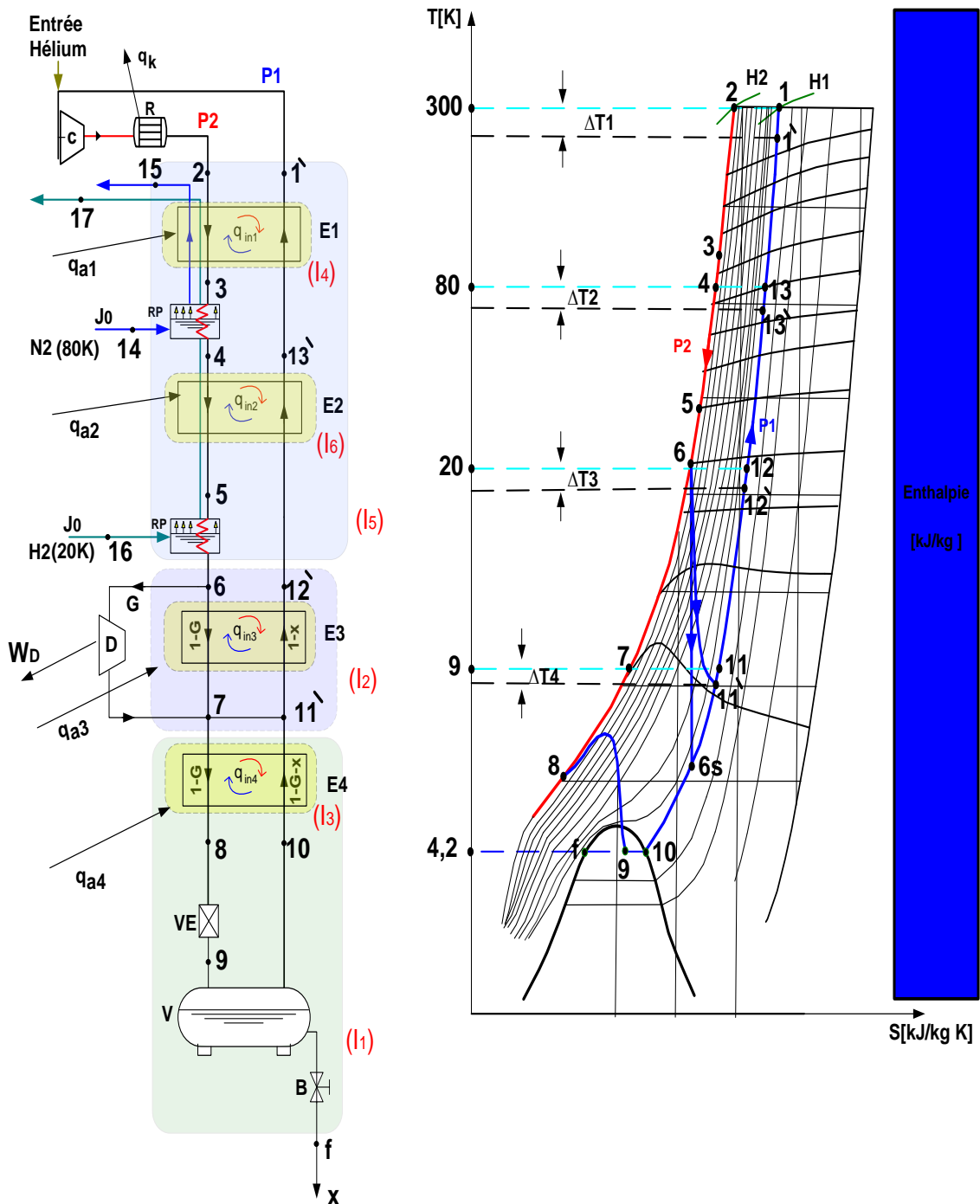


Figure III.10 : Schéma du processus combiné et du cycle associé au processus de liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à $T=20K$ et un taux de détente $\tau=25$

Tableau III.5 : Points figuratifs du cycle à 2 étages de liquéfaction de l'hélium : R.P avec azote liquide à Patm à 80 K et R.P avec hydrogène liquide à 20 K utilisant la combinaison de la détente adiabatique et de l'étranglement isenthalpique (P₂=25atm)

points	P [atm]	T [K]	H [kJ/kg]	S [kJ/kg K]
1	1	300	1574,000	31,610
1'	1	285	1496,105	31,340
2	25	300	1581,000	24,930
3	25	138,2	740,800	20,880
4	25	80	436,900	18,050
13	1	80	431,000	24,750
13'	1	76	410,220	24,470
5	25	36,96	207,079	13,864
6	25	20	109,300	10,350
12	1	20	118,600	17,520
12'	1	19	113,350	17,254
6s	1	5,5	39,930	10,397
7	25	9	39,740	5,335
11	1	9	60,060	13,260
11'	1	8	54,540	12,610
8	25	5,115	24,080	3,117
9	1	4,2	24,080	6,760
10	1	4,2	30,691	8,510
f	1	4,2	9,901	3,551

III.5.1. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique avec P₂=25 atm

Détermination de la quantité de gaz liquéfié

Bilan énergétique du Contour (I1) :

$$(1 - G)h_7 + (1 - G)q_{a4} = x h_f + (1 - G - x)h_{11}'$$

$$h_7 - Gh_7 + q_{a4} - Gq_{a4} = xh_f + h_{11}' - Gh_{11}' - xh_{11}'$$

$$G(h_{11}' - h_7 - q_{a4}) + x(h_{11}' - h_f) = h_{11}' - h_7 - q_{a4}$$

Bilan énergétique du Contour (I2) :

$$h_6 + (1 - G)q_{a3} + Gh_{11}' + (1 - G - x)h_{11}' = (1 - x)h_{12}' + Gh_6 + (1 - G)h_7$$

$$h_6 + q_{a3} - Gq_{a3} + Gh_{11}' + h_{11}' - Gh_{11}' - xh_{11}' = h_{12}' - xh_{12}' + Gh_6 + h_7 - Gh_7$$

$$G(h_7 - h_6 - q_{a3}) + x(h_{12}' - h_{11}') = h_{12}' + h_7 - h_6 - h_{11}' - q_{a3}$$

$$\Delta H_{T3} = h_{12} - h_6 = 118,6 - 109,3$$

Chapitre III. Etude thermodynamique des installations et cycles cryogéniques de liquéfaction de l'Hélium

$$\Delta H_{T3} = 9,3 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad q_{a3} = 0,279 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta H_{T4} = h_{11} - h_7 = 60,06 - 39,74$$

$$\Delta H_{T4} = 20,32 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad q_{a4} = 0,6096 \text{ kJ/kg}$$

$$\Longrightarrow q_{in4} = 5,485 \text{ kJ/kg}$$

L'équation du contour (I1) s'écrit :

$$G(h_{11}' - h_7 - q_{a4}) + x(h_{11}' - h_f) = h_{11}' - h_7 - q_{a4}$$

$$G(54,54 - 39,74 - 0,6096) + x(54,54 - 9,901) = 54,54 - 39,74 - 0,6096$$

$$(14,1904)G + (44,639)x = 14,1904$$

$$G = 1 - 3,1457 x$$

L'équation du contour (I2) s'écrit :

$$G(h_7 - h_6 - q_{a3}) + x(h_{12}' - h_{11}') = h_{12}' + h_7 - h_6 - h_{11}' - q_{a3}$$

$$= (1 - 3,1457 x)(h_7 - h_6 - q_{a3}) + x(h_{12}' - h_{11}') = h_{12}' + h_7 - h_6 - q_{a3} - h_{11}'$$

$$(1 - 3,1457 x)[(39,74) - 109,3 - 0,279] + x(113,35 - 54,54)$$

$$= 113,35 + 39,74 - 109,3 - 0,279 - 54,54$$

$$(1 - 3,1457 x)(-69,84) + 58,81 x = -11,029$$

$$-69,84 + 219,695 x + 58,81 x = -11,029$$

$$-69,84 + 278,505 x = -11,029$$

$$x = 0,22645 = \frac{(1 - G) (\Delta H_{T4} - \sum q_4)}{(h_{11} - h_f - q_{in4})}$$

$$x = 0,2264 \quad \Longrightarrow \quad x = 22,64\%$$

$$G = 1 - 3,1457 x \quad \Longrightarrow \quad G = 1 - [3,1457 (0,22645)]$$

$$G = 0,2876 \text{ kg}$$

Détermination de la quantité de chaleur totale q_0 extraite du gaz de travail par R.P

Bilan énergétique du contour (I5) :

$$h_2 + q_{a1} + J_{0N2} h_{14} + q_{a2} + J_{0H2} h_{16} + (1 - x)h_{12}' \\ = h_6 + (1 - x)h_{11}' + J_{0N2} h_{15} + J_{0H2} h_{17}$$

Chapitre III. Etude thermodynamique des installations et cycles cryogéniques de liquéfaction de l'Hélium

$$h_2 + q_{a1} + q_{a2} + (1 - x)h_{12}' = h_6 + (1 - x)h_1' + J_{ON_2} (h_{15} - h_{14}) + J_{OH_2} (h_{17} - h_{16})$$

$$\begin{aligned} q_0 &= J_{ON_2} (h_{15} - h_{14}) + J_{OH_2} (h_{17} - h_{16}) \\ &= h_2 + q_{a1} + q_{a2} + (1 - x)h_{12}' - (1 - x)h_1' - h_6 \end{aligned}$$

$$q_0 = J_{ON_2} (h_{15} - h_{14}) + J_{OH_2} (h_{17} - h_{16}) = (h_2 - h_6) + (1 - x)(h_{12}' - h_1') + q_{a1} + q_{a2}$$

$$q_0 = (1581 - 109,3) + (1 - 0,2265)(113,35 - 1496,105) - 0,21 - 0,177$$

$$\mathbf{q_0 = 401,68 \text{ kJ/kg}}$$

Calcul de h_3 sortie de l'échangeur E1

Bilan énergétique du contour (I4):

$$h_2 + q_{a1} + (1 - x)h_{13}' = (1 - x)h_1' + h_3$$

$$h_3 = h_2 + (1 - x)(h_{13}' - h_1') + q_{a1}$$

$$h_3 = 1581 + (1 - 0,22645)(410,22 - 1496,105) - 0,21$$

$$\mathbf{h_3 = 740,80 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad \mathbf{T_3 = 138,2 \text{ K}}$$

Calcul de h_5 à la sortie de l'échangeur E2

Bilan énergétique du contour (I6) :

$$h_4 + q_{a2} + (1 - x)h_{12}' = (1 - x)h_{13}' + h_5$$

$$h_5 = h_4 + (1 - x)(h_{12}' - h_{13}') + q_{a2}$$

$$h_5 = 436,9 + (1 - 0,22645)(113,35 - 410,22) - 0,177$$

$$\mathbf{h_5 = 207,079 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad \mathbf{T_5 = 36,96 \text{ K}}$$

Calcul de h_8 à la sortie de l'échangeur E4

Bilan énergétique du contour (I3) :

$$(1 - G)h_7 + (1 - G)q_{a4} + (1 - G - x)h_{10} = (1 - G)h_8 + (1 - G - x)h_{11}'$$

$$(1 - G)h_8 = (1 - G)(h_7 + q_{a4} + h_{10} - h_{11}') + x(h_{11}' - h_{10})$$

$$h_8 = (h_7 + q_{a4} + h_{10} - h_{11}') + \left[\frac{x(h_{11}' - h_{10})}{(1 - G)} \right]$$

$$h_8 = (39,74 + 0,6096 + 30,901 - 54,54) + \left[\frac{0,22645(54,54 - 30,691)}{1 - 0,2876} \right]$$

$$h_8 = h_9 = 24,08 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad T_8 = 5,11 \text{ K}$$

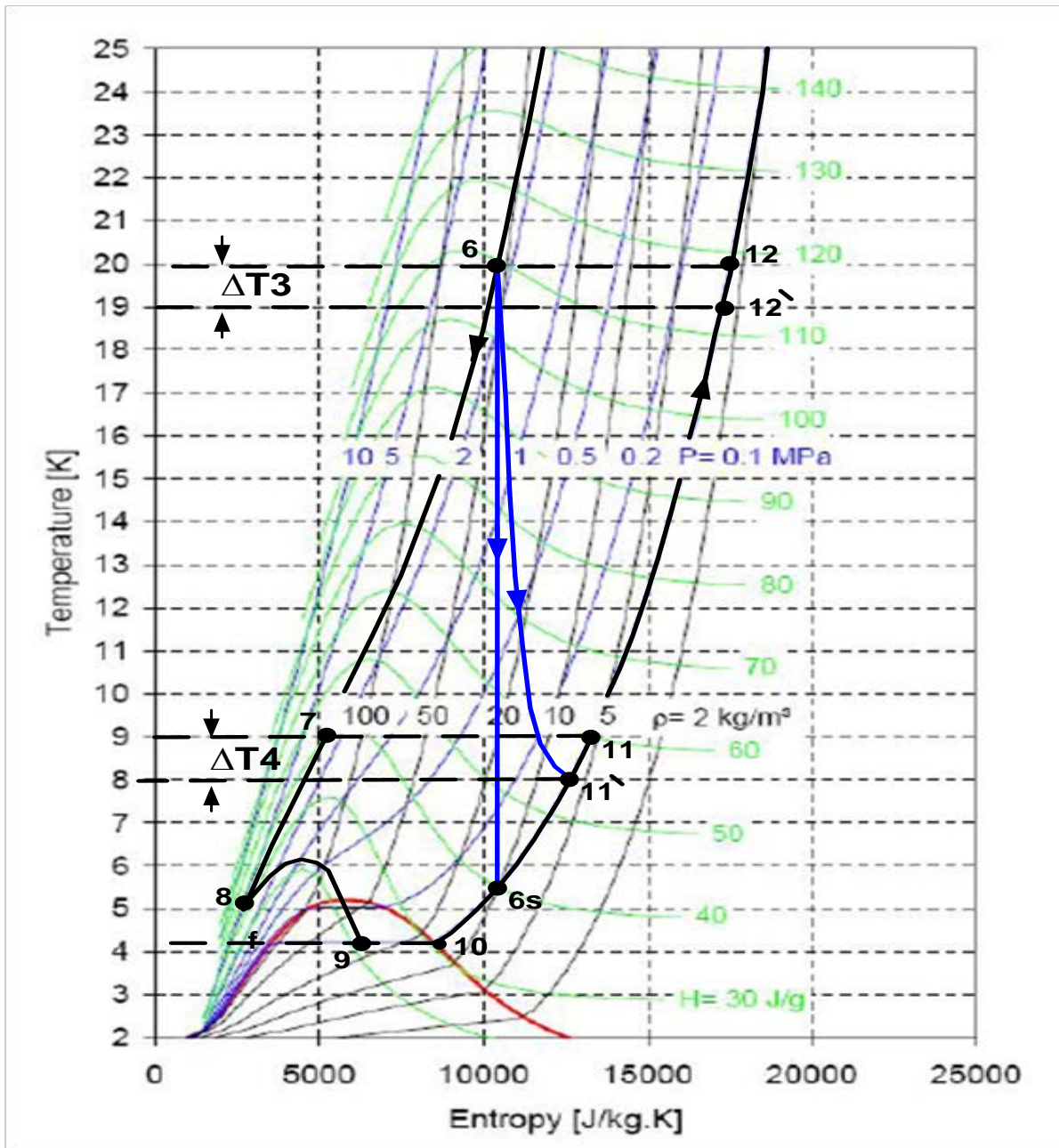


Figure III.11: Représentation du cycle combiné en coordonnées T-S à 2 étages R.P avec azote liquide saturé à 80 K et hydrogène liquide à 20 K utilisant la détente adiabatique et de l'étranglement isenthalpique avec ($P_2 = 25 \text{ atm}$)

Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique

Travail du compresseur :

$$W_k = \frac{rT_1 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\eta_k} = \frac{2,076 (300) \ln\left(\frac{25}{1}\right)}{0,65}$$

$$W_k = 3084,18 \text{ kJ/kg}$$

Travail supplémentaire :

$$W_{\text{supp}} = \frac{q_0 \text{ totale}}{q_{x \text{ supp}}} = \frac{401,6828}{1,05}$$

$$W_{\text{supp}} = 382,55 \text{ kJ/kg}$$

Travail du détendeur :

$$W_D = \eta_{\text{méc}} G(h_6 - h_{11}') = 0,9 (0,2876) (109,3 - 54,54)$$

$$W_D = 14,17 \text{ kJ/kg}$$

Travail total:

$$W_{\text{total}} = W_k + \beta W_{\text{supp}} - W_D = 3084,17825 + 1,2(382,555) - 14,174$$

$$W_{\text{total}} = 3529,07 \text{ kJ/kg}$$

Travail spécifique :

$$W_0 = \frac{W_{\text{total}}}{x} = \frac{3529,07}{0,22645}$$

$$W_0 = 15584,32 \text{ kJ/kg}$$

Coefficient frigorifique réel : $\epsilon_{\text{réel}} = \frac{q_x}{W_{\text{total}}}$

$$q_x = x (h_1 - h_f) = 0,22645(1574 - 9,901)$$

$$q_x = 354,1902 \text{ kJ/kg}$$

$$\epsilon_{\text{réel}} = \frac{354,1902}{3529,07}$$

$$\epsilon_{\text{réel}} = 0,10036$$

Coefficient frigorifique théorique :

$$\epsilon_{\text{th}} = \frac{(h_1 - h_f)}{T_1(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)}$$

$$\varepsilon_{th} = \frac{1574 - 9,901}{300(31,61 - 3,551) - (1574 - 9,901)}$$

$$\varepsilon_{th} = \mathbf{0,2282}$$

Le rendement thermodynamique :

$$\eta = \frac{\varepsilon_{réel}}{\varepsilon_{th}} = \frac{0,10036}{0,228215}$$

$$\eta = \mathbf{0,4397 = 43,97\%}$$

III.6. Comparaison du cycle combiné avec le cycle à étranglement simple à deux étages de R.P fonctionnant avec de l'azote liquide à 80 K et de l'hydrogène liquide à 20 K à la pression $P_2=25\text{atm}$

Tableau III.6 : Caractéristiques thermodynamiques du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium

Cycles	W_k [kJ/kg]	X [%]	W_0 [kJ/kg]	q_0 [kJ/kg]	$\varepsilon_{réel}$	η_{th} [%]
ES+R.P	3084,18	3,65	88966,49	139,029	0,0176	7,70
Combiné	3084,18	22,65	15584,325	401,683	0,1004	43,97

Commentaire :

- Le coefficient de liquéfaction est nettement amélioré, il passe de 3.65 à 22,65 %
- La consommation d'énergie spécifique diminue énormément d'environ 89000 à 16000 kJ/kg
- Le rendement du cycle combiné est nettement supérieur à celui du cycle à étranglement avec R.P (presque 6 fois plus grand).

Chapitre IV. DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ORGANES DE L'INSTALLATION CRYOGENIQUE DE LIQUEFACTION DE L'HELIUM

IV.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à la détermination des principales caractéristiques techniques des principaux équipements de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'hélium ayant enregistré les meilleures performances thermodynamiques à savoir celle du cycle combiné à deux étages de refroidissement préalable. On se limitera au choix du compresseur ainsi qu'au dimensionnement d'un échangeur de chaleur.

IV.2 Les compresseurs [30-32]

Les compresseurs sont des appareils indispensables dans une installation cryogénique, ils sont utilisés afin d'augmenter la pression du gaz de travail, pour cela ils agissent sur le volume ou la vitesse du gaz à comprimer.

IV.2.1 Les différents types de compresseurs

Les compresseurs sont choisis selon le type de gaz de travail (gaz pur, mélange gazeux...etc.) ainsi que les pressions à atteindre.

Pour une application cryogénique on distingue deux (02) types de compresseurs souvent utilisés :

- Les compresseurs volumétriques

La compression est réalisée par une action directe sur le volume d'une masse gazeuse, car la réduction du volume est accompagnée par un accroissement de pression.

Les compresseurs fonctionnant avec ce principe sont les compresseurs à pistons et les compresseurs à vis.

- Les turbo-compresseurs

Les turbo-compresseurs sont des machines tournantes, ils agissent sur la vitesse du gaz de travail en transformant l'énergie cinétique en énergie de pression grâce à des roues à aubes calées sur un arbre (doté d'une certaine vitesse de rotation).

Les compresseurs fonctionnant avec ce principe peuvent être de types centrifuges, axiaux ou mixtes.

IV.2.2 Fonctionnement des compresseurs volumétriques à pistons

Les compresseurs à pistons sont très performants, leur conception dépend de la taille de l'installation (petite, moyenne ou grande puissance) avec des possibilités de raccordement hermétique, semi hermétique ou ouvert au moteur d'entraînement.

Chapitre IV. Dimensionnement des principaux organes de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'Hélium

Les trois (03) étapes réalisées dans ce type de machines sont (l'admission, la compression et le refoulement).

L'admission :

Le clapet d'admission s'ouvre. Le gaz de travail BP (Basse Pression) est aspiré dans le cylindre jusqu'à ce que le piston descende au PMB (Point Mort Bas).

La compression :

Lorsque le piston commence à remonter vers le haut, le clapet d'aspiration se referme, dans ce cas, la pression du gaz de travail augmente HP (Haute Pression).

Le refoulement :

A un certain niveau lors de la remontée du piston, le clapet de refoulement s'ouvre. Le piston monte ensuite jusqu'au PMH (Point Mort Haut), le gaz de travail comprimé est quant à lui évacué vers un collecteur.

IV.2.3 Fonctionnement des compresseurs à vis

Les compresseurs à vis sont à la fois, performants et très silencieux. Ils sont utilisés au niveau des grandes installations avec des possibilités de raccordement semi hermétique ou ouverts aux moteurs d'entraînement.

Avec ce type de compresseurs, la réduction du volume du gaz de travail se réalise suite à la rotation de vis.

Il en existe deux types : les mono rotors-pignons (une seule vis) et les bi-rotors (deux vis).

- **Les compresseurs à vis mono rotors-pignons :**

Très peu utilisés industriellement, ces compresseurs sont constitués d'une vis centrale (arbre) avec une forme spéciale afin d'être reliée à deux satellites (Fig. IV.1). Comme pour les compresseurs à pistons, les 3 étapes réalisées dans ce type de machines sont : l'admission, la compression et le refoulement.

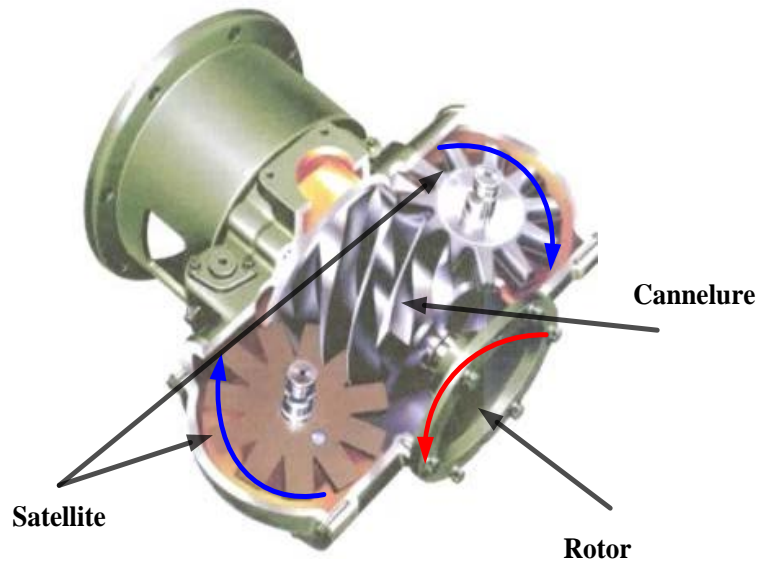


Figure IV.1: Compresseur mono-vis

L'admission :

Lorsque la vis commence à tourner, le gaz de travail est véhiculé grâce aux cannelures de la vis jusqu'à son arrivée dans le volume délimité par le carter.

La compression :

Ici vient le rôle des deux satellites, entraînés par le rotor, ils diminuent le volume du gaz de travail qui les traverse. Il en découle l'augmentation de la pression.

Le refoulement :

En fin de compression, le gaz est refoulé par la rotation de la vis vers un collecteur de refoulement.

- **Les compresseurs à vis double rotors :**

Ce compresseur est constitué de deux rotors (male et femelle) ayant des profils très spéciaux formant des lobes (vis male) et des alvéoles (vis femelle).

Ces derniers tournent à de grandes vitesses et nécessitent une bonne lubrification (afin d'assurer l'étanchéité et le refroidissement des pièces mécaniques).

La conception de plusieurs étages sera avantageuse pour des taux de compression encore plus élevés.

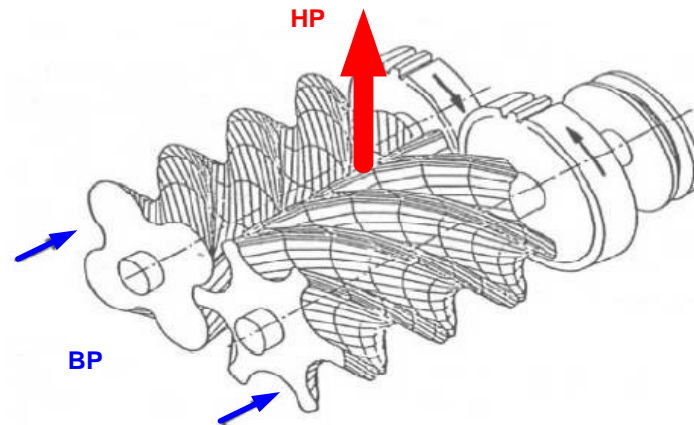


Figure IV.2: Compresseur double-vis

L'admission :

Dès que les rotors se mettent en mouvement, le gaz de travail est transporté le long de la vis depuis l'orifice d'aspiration jusqu'à remplissage des espaces inter lobaires.

La compression :

Le volume du gaz se réduit avec la rotation des vis, du fait que les lobes du rotor mâles viennent s'aplatir sur les alvéoles des rotors femelles contenant le gaz de travail.

Le refoulement :

Le refoulement commence dès que le gaz de travail atteint l'orifice d'évacuation.

IV.2.4. Principaux organes des compresseurs à pistons

Vilebrequin :

Le vilebrequin est un dispositif mécanique qui permet la transformation du mouvement de rotation en un mouvement linéaire rectiligne au piston par l'intermédiaire d'une bielle, et inversement.

La bielle :

Elle assure la transmission du mouvement au piston grâce aux articulations de ces extrémités.

Le piston :

Le piston est la pièce coulissante dans un cylindre. Le mouvement de va et vient du piston fait balayer le gaz de travail et permet donc de diminuer le volume tout en augmentant la pression.

Les clapets :

Les clapets sont des pièces d'une très grande importance dans un compresseur à piston. Ces pièces sont exposées au danger de rupture et à des perturbations à cause des différences de pression et de température.

Quand le piston est au PMH, le clapet de refoulement est fermé (aucune différence de pression de part et d'autre du clapet). Ici il doit y avoir un espace nuisible au dessus du cylindre contenant une petite quantité de gaz HP afin de maintenir le clapet d'aspiration fermé jusqu'à un certain niveau (Fig. IV.3). En descendant vers PMB, le piston arrive à un certain niveau où la BP est supérieure à la pression qui règne dans le cylindre. Ici le clapet d'admission s'ouvre automatiquement.

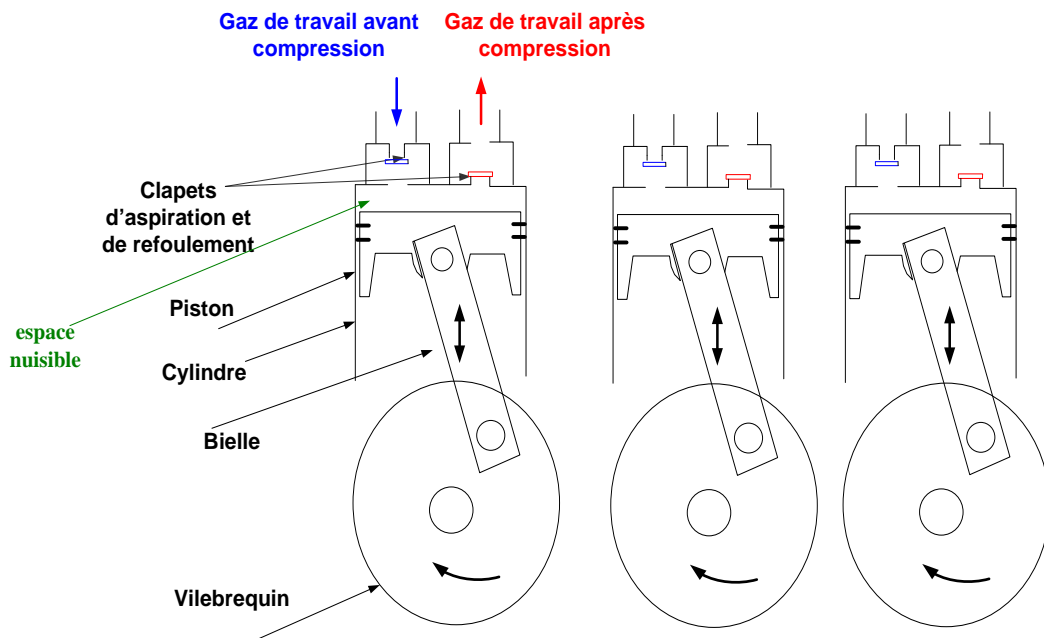


Figure IV.3 : Liaison mécanique dans un compresseur à pistons

IV.3 Calcul thermodynamique des caractéristiques du compresseur à pistons de l'installation de liquéfaction de l'hélium

Pour un rendement optimal de l'installation, il faudra dimensionner un compresseur à pistons capable de réaliser un taux de compression optimal

IV.3.1 Choix du taux de compression optimal

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{25}{1}$$

$$\tau = 25$$

Chapitre IV. Dimensionnement des principaux organes de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'Hélium

IV.3.2. Calcul du débit massique

En choisissant un compresseur à pistons d'une puissance : $P = 1,5 \text{ MW}$ et connaissant le travail de compression: $W_{25 \text{ atm}} = 3084178,25 \text{ J/kg}$, on détermine le débit massique du gaz hélium par :

$$P = \dot{m} W$$

$$\dot{m} = \frac{P}{W} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{3084178,25}$$

$$\dot{m} = \mathbf{0,486 \text{ kg/s} = 1750,872 \text{ kg/h}}$$

IV.3.3. Calcul du volume de gaz aspiré par le compresseur

$$V_{\text{aspiré}} = \frac{\dot{m}}{\rho_{\text{He}}} = \frac{1750,872}{0,16}$$

$$V_{\text{aspiré}} = \mathbf{10942,947 \text{ m}^3/\text{h}}$$

IV.3.4. Calcul du volume de gaz balayé par le compresseur

Pour un rendement volumétrique estimé à $\eta_v = 0,81$

$$\eta_v = \frac{V_{\text{aspiré}}}{V_{\text{balayé}}} = 0,81$$

$$V_{\text{balayé}} = \frac{V_{\text{aspiré}}}{\eta_v} = \frac{10942,947}{0,81}$$

$$V_{\text{balayé}} = \mathbf{13509,811 \text{ m}^3/\text{h}}$$

IV.3.5. Calcul de la cylindrée

$$V_{\text{balayé}} = C_y \cdot N$$

Pour une vitesse de rotation choisie $N = 370 \text{ tr/min} = 22200 \text{ tr/h}$

$$C_y = \frac{V_{\text{balayé}}}{N} = \frac{13509,811}{22200}$$

$$C_y = \mathbf{0,609 \text{ m}^3}$$

IV.3.6. Choix des dimensions des pistons du compresseur

Pour une telle cylindrée on proposera :

Un alésage : $\mathbf{D = 0,510 \text{ m}}$

Une course du piston : $\mathbf{C = 0,745 \text{ m}}$

Un nombre de cylindres : $\mathbf{n = 4}$

IV.3.6 Vérification des dimensions choisies

$$C_y = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \text{Course} \cdot n = \frac{(3,14) (0,510)^2}{4} \cdot 0,745 \cdot 4$$

$$C_y = 0,609 \text{ m}^3$$

Tableau IV.1 : Caractéristiques du compresseur à pistons dimensionné

$V_{\text{balayé}}$ [m ³ /h]	P_{finale} [atm]	Vitesse [tr/min]	Puissance [MW]	Cylindrée [m ³]
13509,811	25	370	1,5	0,609

IV.4. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur [33-35]

IV.4.1. Définition

Les échangeurs de chaleur sont utilisés dans un grand nombre d'applications dans plusieurs domaines (industrie, transport, quotidien...) pour des refroidissements ou des réchauffements et pour des changements de phases.

Ce sont des dispositifs capables de récupérer de l'énergie thermique d'un fluide à un autre en présence d'une différence de température.

Les échangeurs de chaleur sont surtout choisis en fonction des propriétés physiques des fluides, de leur agressivité ainsi qu'en fonction de l'encombrement.

Les plus utilisés sont les échangeurs tubulaires, ils restent les plus adaptés vu les conditions de pression et de température qu'ils peuvent supporter.

IV.4.2. Classification des échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés en fonction

- De la conception de l'échangeur (tubulaires, à plaques...etc.)
- Du mode de transfert de chaleur (conduction, convection)
- Des critères de performance d'un échangeur (efficacité, coefficient d'échange global, compacité)
- Des paramètres métallurgiques
- Du contact entre les fluides en circulation (direct ou à mélange)
- Du sens de l'écoulement des fluides.

On distingue :

- **Les échangeurs à courants parallèles (co-courants) :**

Les fluides chauds et froids circulent parallèlement dans le même sens.

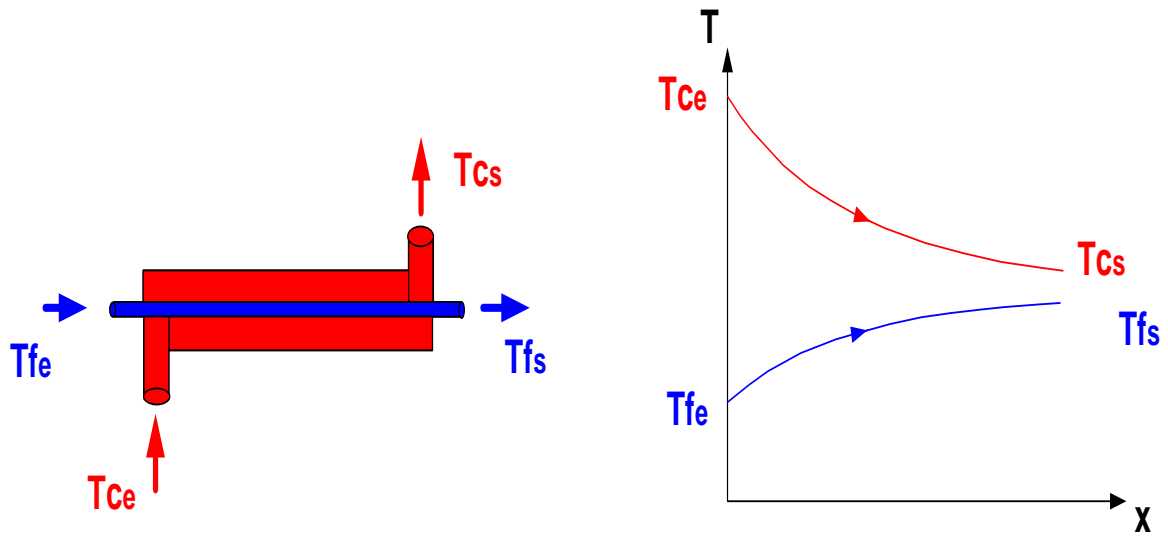


Figure. IV.4 : Echangeur à co-courants

- **Les échangeurs à contre-courants :**

Les fluides chauds et froids circulent parallèlement dans des sens opposés.

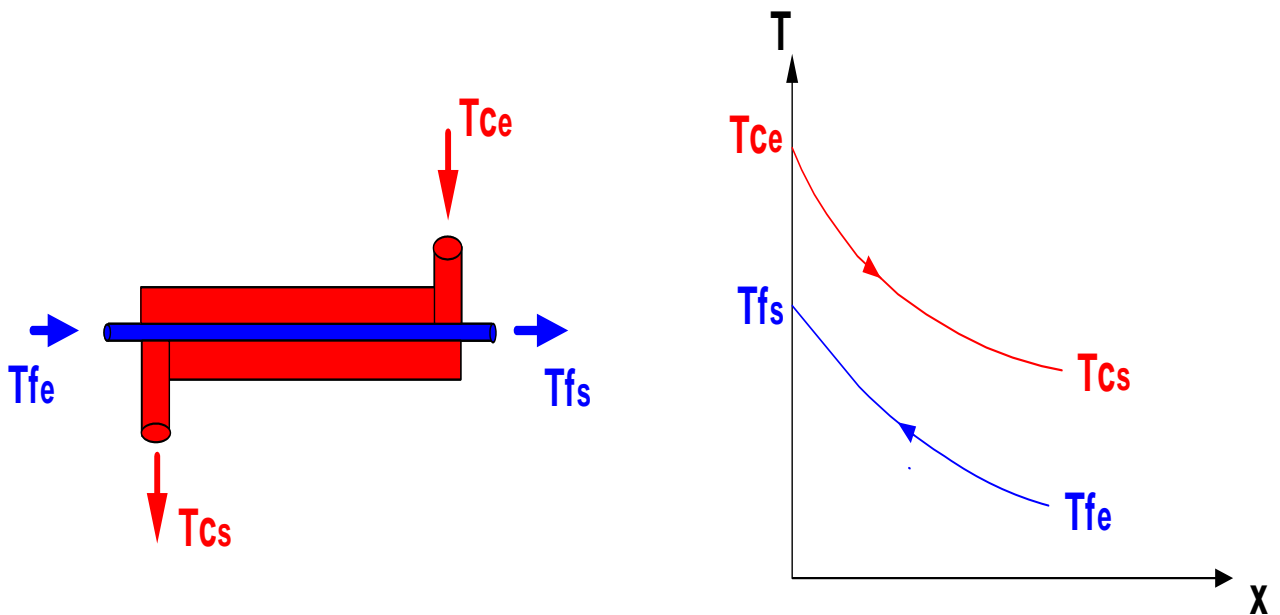


Figure. IV.5 : Echangeur de chaleur à contre-courants

- **Les échangeurs à courants croisés :**

Les fluides chauds et froids circulent perpendiculairement.

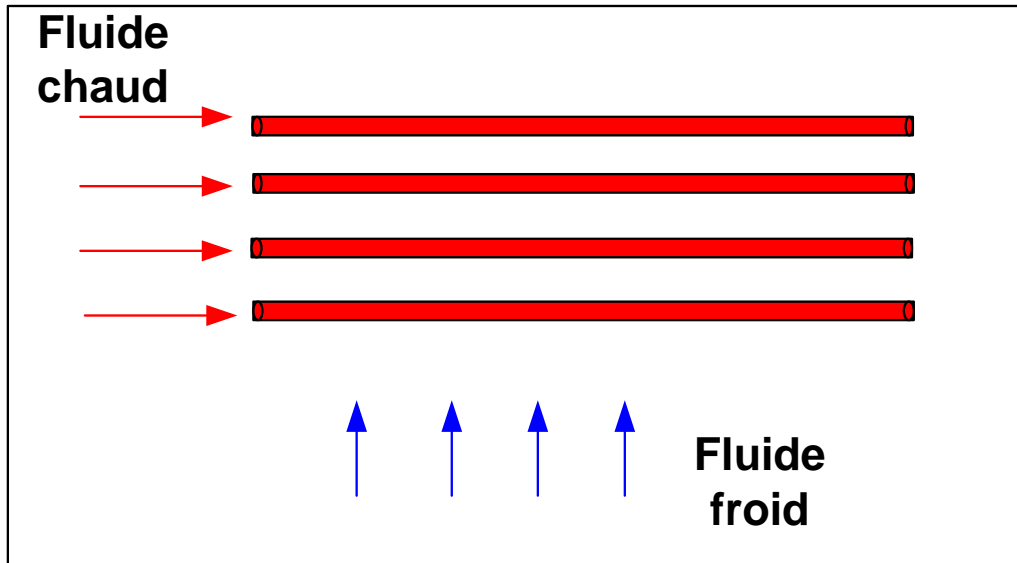


Figure. IV.6 : Echangeur de chaleur à courants croisés

- **Les échangeurs avec plusieurs types d'écoulements :**

Les fluides chauds et froids circulent dans tout les sens.

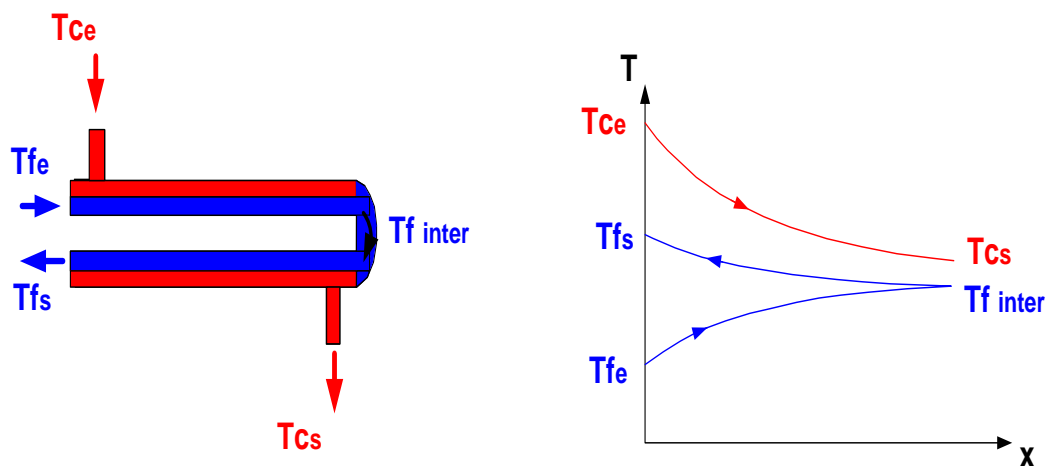


Figure. IV.7 : Echangeur de chaleur à tubes et calandre

IV.4.3. Les échangeurs à faisceaux tubulaires et calandre

Pour faire face aux problèmes d'encombrement avec de simples échangeurs et pour résister aux applications de conditions extrêmes tout en aboutissant à d'importantes surfaces d'échange, les chercheurs ont du développer d'autres géométries d'échange d'où l'apparition des échangeurs à faisceaux tubulaires et calandre.

Chapitre IV. Dimensionnement des principaux organes de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'Hélium



Figure IV.8: Vues diverses d'échangeurs de chaleur à faisceaux tubulaires et calandre

Ces échangeurs sont actuellement les plus répandus. Un premier fluide traverse le faisceau de tubes tandis qu'un second circule dans la calandre (enveloppe). C'est ainsi que le transfert de chaleur s'effectue sans que les fluides ne soient mélangés.

Ces échangeurs conçus par le standard américain TEMA existent en plusieurs modèles en fonction du type de boîtes avant, de retour et des types d'enveloppe. Ce qui fera la différence c'est le nombre de passages côté tubes et côté calandre (simple passe, 4-1, 4-2, avec chicanes) permettant d'avoir plusieurs natures d'écoulement dans un seul échangeur (faisant sa particularité).

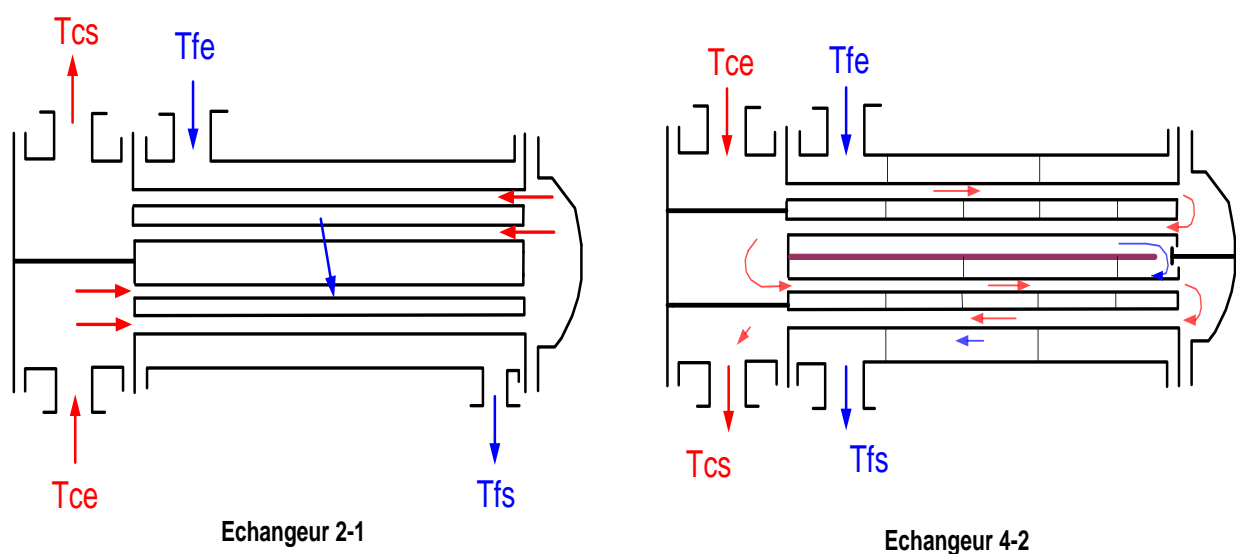


Figure. IV. 9 : Types d'échangeurs de chaleur à faisceaux tubulaires et calandre

IV.4.3.1. Principaux organes des échangeurs à tubes et calandre

Boîte d'échangeur :

Ce sont des boîtes placés aux extrémités des tubes afin de distribuer le fluide d'un côté et de le récupérer de l'autre. Leurs formes dépendent du nombre de passage du fluide côté tubes.

Calandre:

C'est une enveloppe qui englobe le faisceau tubulaire faisant circuler l'un des deux fluides en un seul passage.

Ici des chicanes (plaques métalliques) peuvent être ajoutées pour que le fluide effectue plusieurs passages côté calandre. Ces plaques peuvent également augmenter la résistance mécanique de l'échangeur.

Plaques tubulaires :

Ce sont des plaques percées supportant les tubes à leurs extrémités par clouage ou par soudure. Elles représentent les parties délicates des échangeurs à faisceau tubulaire à cause des différences de pression et de température qui règnent entre le fluide dans la calandre et le fluide dans les boîtes (tubes).

Le faisceau tubulaire:

Ce sont des tubes normalisés de même longueur avec des épaisseurs théoriquement négligeables disposés (arrangés) en pas carré ou en pas triangulaire.

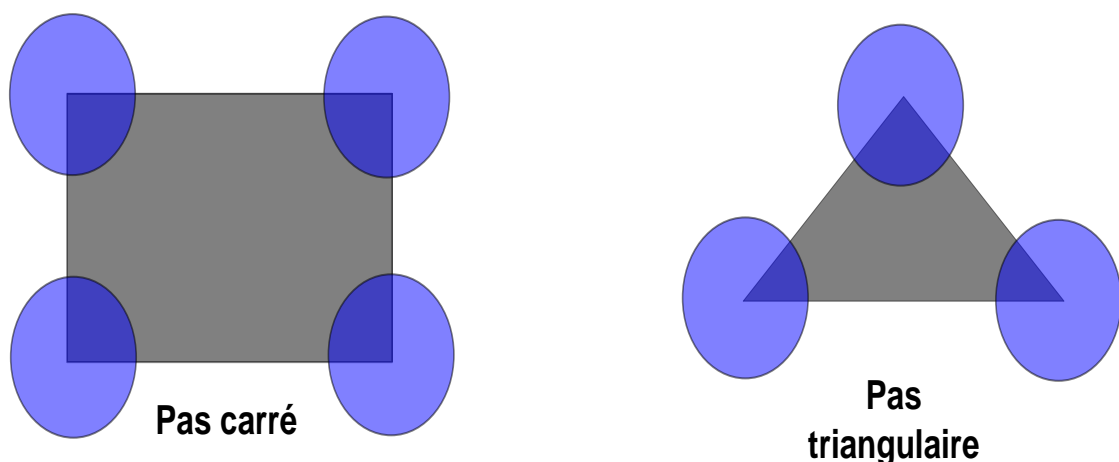


Figure. IV. 10 : Arrangement des tubes au niveau d'un échangeur de chaleur pour les pas carré et triangulaire

IV.5 Calcul thermique de l'échangeur tubulaire E1 du cycle hélium à étranglement simple avec R.P

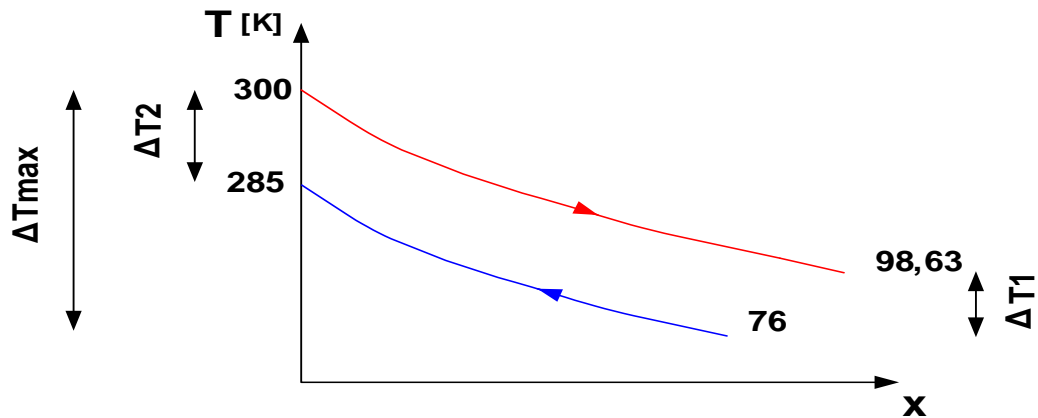


Figure. IV. 11 : Variations de température du gaz de travail dans l'échangeur E1 du cycle à E.S avec R.P

IV.5.1. Calcul du flux thermique

La puissance échangée est :

$$\Phi = \Phi_c = \Phi_f$$

$$\Phi = \dot{m}_c C_{pc} \Delta T_c = \dot{m}_f C_{pf} \Delta T_f$$

$$\Phi = \dot{m}_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs})$$

$$\Phi = (0,486)(5,194)(300 - 98,63)$$

$$\Phi = 508,713 \text{ kW}$$

IV.5.2. Propriétés des fluides chaud et froid

Propriétés du fluide chaud :

$$Q_v = 10942,947 \text{ m}^3/\text{h} = 3,039 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m}_c = 1751 \text{ kg/h} = 0,486 \text{ kg/s}$$

Tableau IV.2 : Propriétés thermiques du fluide chaud

$T_{moyenne}$ [K]	P_{finale} [atm]	ρ_c [kg/m ³]	C_{pc} [kJ/kg K]	C_{vc} [kJ/kg K]	μ_c [Pa. s]	λ_c [W/m K]
199,315	25	5,911	5,194	3,124	$15,32 \cdot 10^{-6}$	0,1199

Chapitre IV. Dimensionnement des principaux organes de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'Hélium

$$\dot{C}_c = \dot{m}_c C_{pc} = (0,486)(5,194 \cdot 10^3)$$

$$\dot{C}_c = 2526,2577 \text{ W/K} = 2,5262577 \text{ kW/K}$$

Propriétés du fluide froid :

$$\Phi = \Phi_f = \dot{m}_f C_{pf} \Delta T_f = \dot{m}_f C_{pf} (T_{fs} - T_{fe})$$

$$\dot{m}_f = \frac{\Phi}{C_{pf} \Delta T_f} = \frac{508,7125 \cdot 10^3}{5,193 \cdot 10^3 (285 - 76)}$$

$$\dot{m}_f = 0,469 \text{ kg/s}$$

Tableau IV.3 : Propriétés thermiques du fluide froid

$T_{moyenne}$ [K]	P_{finale} [atm]	ρ_f [kg/m ³]	C_{pf} [kJ/kg K]	C_{vf} [kJ/kg K]	μ_f [Pa.s]	λ_f [W/m K]
180,5	1	0,26	5,193	3,116	$14,5 \cdot 10^{-6}$	0,1179

$$\dot{C}_f = \dot{m}_f C_{pf} = (0,469)(5,193 \cdot 10^3)$$

$$\dot{C}_f = 2434,0311 \text{ W/K} = 2,4340311 \text{ kW/K}$$

IV.5.3. Calcul du rapport des taux de capacités thermiques

Le rapport des débits de capacité thermique des deux fluides est :

$$R = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{\dot{C}_f}{\dot{C}_c}$$

Nous avons :

$$\Phi_c = \Phi_f \implies \dot{C}_c \Delta T_c = \dot{C}_f \Delta T_f$$

$$R = \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{max}} = \frac{\dot{C}_f}{\dot{C}_c}$$

$$R = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_f} = \frac{(300 - 98,63)}{(285 - 76)}$$

$$R = 0,964$$

IV.5.4. Calcul du flux thermique maximal

$$\Phi_{max} = C_{min} \Delta T_{max} = \dot{C}_f \Delta T_{max}$$

$$\Phi_{max} = 2434,0311 (300 - 76)$$

$$\Phi_{max} = 545,22 \text{ kW}$$

IV.5.5. Calcul de l'efficacité de l'échangeur

L'efficacité de l'échangeur est :

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} = \frac{508,7125}{545,222966}$$

$$\varepsilon = 0,933$$

IV.5.6. Calcul de la différence de température logarithmique moyenne ΔTLM

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

$$\Delta T_2 = 300 - 285 = 15 \text{ K}$$

$$\Delta T_1 = 98,63 - 76 = 22,63 \text{ K}$$

$$\Delta TLM = 18,55 \text{ K}$$

IV.5.7. Correction de la différence de température logarithmique moyenne ΔTLM

Pour un échangeur avec 1 passage côté calandre et 2 passages côté tubes :

Facteur = 0,9

$$\Delta TLM_{\text{corrigé}} = (\Delta TLM)(\text{Facteur de correction})$$

$$\Delta TLM_{\text{corrigé}} = (18,554)(0,9)$$

$$\Delta TLM_{\text{corrigé}} = 16,699 \text{ K}$$

Dans ce cas de figure, il est nécessaire de dimensionner une série d'échangeurs à faisceaux tubulaires (2-1) dans lesquels le fluide froid circule du côté des tubes disposé en pas carré tandis que le fluide chaud circule du côté de la calandre.

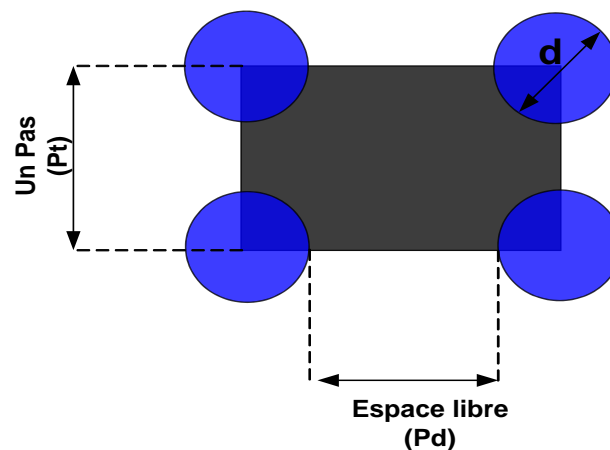


Figure. IV. 12 : Arrangement des tubes au niveau d'un échangeur tubulaire (pas carré).

Tableau IV.4 : Normes des tubes en fonction du diamètre de la calandre

Diamètre de la calandre D_c [m]	0,59
Nombre de tubes N_{tubes}	42
Diamètre extérieur des tubes d_{ext} [m]	0,019
Diamètre intérieur des tubes d_{int} [m]	0,0122
Pas des tubes P_t [m]	0,0254
Epaisseur du tube e [m]	0,0034
Espace libre entre deux tubes P_d [m]	0,0064
Espacement des chicanes L_b [m]	0,18
Section d'un tube S [m ²]	$1,168 \cdot 10^{-4}$
Section de 21 tubes $S_{21 \text{ tubes}}$ [m ²]	$2,453 \cdot 10^{-3}$

IV.5.8. Calcul du coefficient d'échange interne (coté tubes)

La vitesse du fluide chaud est :

$$\dot{m}_c = \rho_c \cdot V_c \cdot S_{21 \text{ tubes}}$$

$$V_c = \frac{\dot{m}_c}{\rho_c \cdot S_{21 \text{ tubes}}} = \frac{0,486}{(5,911)(2,453 \cdot 10^{-3})}$$

$$V_c = \mathbf{33,518 \text{ m/s}}$$

Le nombre de Reynolds est alors égal à :

$$Re_c = \frac{\rho_c \cdot V_c \cdot d_{\text{int}}}{\mu_c}$$

$$Re_c = \frac{(5,911)(33,518)(0,0122)}{15,32 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re_c = \mathbf{157775,702} > 10000 \quad \Longrightarrow \quad \text{Le régime est turbulent.}$$

Le nombre de Prandtl est :

$$Pr_c = \frac{\mu_c \cdot C_{pc}}{\lambda_c} = \frac{(15,32 \cdot 10^{-6})(5,194 \cdot 10^3)}{0,1199}$$

$$Pr_c = \mathbf{0,66365}$$

Le nombre de Nusselt est calculé en utilisant la formule de (Dittus et Boelter) soit :

$$Nu_c = 0,0241 Re_c^{0,8} Pr_c^{0,4}$$

$$Nu_c = 0,0241 (157775,702)^{0,8} (0,66365)^{0,4}$$

$$Nu_c = \mathbf{294,595}$$

Chapitre IV. Dimensionnement des principaux organes de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'Hélium

Le coefficient d'échange intérieur est :

$$h_c = \frac{Nu_c \cdot \lambda_c}{d_{int}} = \frac{(294,595)(0,1199)}{0,0122}$$

$$h_c = 2895,241 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

IV.5.9. Calcul du coefficient d'échange externe (coté calandre)

On utilise la méthode de Kern. La vitesse permettant de calculer le nombre de Reynolds est déterminée à l'aide de la section disponible comprise entre deux chicanes et entre deux tubes soit :

$$S_d = D_c \cdot L_b \left(\frac{P_d}{P_t} \right)$$

$$S_d = (0,59)(0,18) \left(\frac{0,0064}{0,0254} \right)$$

$$S_d = 0,026759 \text{ m}^2$$

D'où la vitesse du fluide froid est :

$$\dot{m}_f = \rho_f \cdot V_f \cdot S_d$$

$$V_f = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f \cdot S_d} = \frac{0,469}{(0,26)(0,026759)}$$

$$V_f = 67,411 \text{ m/s}$$

Le nombre de Reynolds est par définition :

$$Re_f = \frac{\rho_f \cdot V_f \cdot D_{\text{éq}}}{\mu_f}$$

$$\text{D'où : } D_{\text{éq}} = \frac{4 \cdot S}{p_m}$$

$$D_{\text{éq}} = \frac{4 \left[P_t^2 - \left(\frac{\pi d_{\text{ext}}^2}{4} \right) \right]}{\pi \cdot d_{\text{ext}}}$$

$$D_{\text{éq}} = \frac{4 \left(0,0254^2 - \left(\frac{3,14 \cdot 0,019^2}{4} \right) \right)}{3,14 (0,019)}$$

$$D_{\text{éq}} = 0,024255778 \text{ m}$$

Le nombre de Reynolds est alors égal à :

Chapitre IV. Dimensionnement des principaux organes de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'Hélium

$$Re_f = \frac{(0,26)(67,411)(0,024255778)}{14,5 \cdot 10^{-6}}$$

Re_f = 29319,147 > 10000 \Rightarrow Le régime est turbulent.

Le nombre de Prandtl est :

$$Pr_f = \frac{\mu_f \cdot C_{pf}}{\lambda_f} = \frac{(14,5 \cdot 10^{-6})(5,193 \cdot 10^3)}{0,11798}$$

Pr_f = 0,63823

Le nombre de Nusselt est donné par la corrélation de Kern:

$$Nu_f = 0,36 Re_f^{0,55} Pr_f^{1/3}$$

$$Nu_f = 0,36 (29319,147)^{0,55} (0,63823)^{1/3}$$

Nu_f = 88,7622

Le coefficient d'échange extérieur est :

$$h_f = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{D_e} = \frac{(88,7622)(0,11798)}{0,024255778}$$

h_f = 431,739 W/m² K

Tableau IV.5 : Tableau récapitulatif des caractéristiques de l'écoulement des fluides chaud et froid

	T entrée (K)	T sortie (K)	ṁ (kg/s)	V (m/s)	Re	Pr	Nu	h (W/m²K)
Fluide chaud	300	98,63	0,486	33,518	157775	0,66	294,595	2895,241
Fluide froid	76	285	0,469	67,411	29319,147	0,64	88,7622	431,739

IV.5.10. Calcul du coefficient d'échange global

Le coefficient d'échange global est donné par la relation :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{d_{int}}{2 \cdot \lambda_p} \ln \left(\frac{d_{ext}}{d_{int}} \right) + \frac{1}{h_f} \left(\frac{d_{int}}{d_{ext}} \right) + R_{si} + R_{se} \left(\frac{d_{int}}{d_{ext}} \right)$$

Le coefficient d'échange global est calculé en supposant un échangeur neuf (sans encrassement) et une conductivité thermique $\lambda_p = 50 \text{ W/m.K}$:

Chapitre IV. Dimensionnement des principaux organes de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'Hélium

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{2895,241} + \frac{0,0122}{2(50)} \ln\left(\frac{0,019}{0,0122}\right) + \frac{1}{431,739} \left(\frac{0,0122}{0,019}\right)$$

$$U = 530,039 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

IV.5.11. Calcul de la surface d'échange

On en déduit la surface d'échange :

$$\Phi = U S \Delta TLM_{\text{corrigé}}$$

$$S = \frac{\Phi}{U \cdot \Delta TLM_{\text{corrigé}}} = \frac{508,713 \cdot 10^3}{(385,835)(16,699)}$$

$$S = 57,474 \text{ m}^2$$

IV.5.12. Calcul de la longueur des tubes

La longueur des tubes dans la calandre est :

$$S = \pi d_{\text{int}} L_{\text{totale}} N_{\text{tubes}}$$

$$L_{\text{totale}} = \frac{S}{\pi d_{\text{int}} N_{\text{tubes}}}$$

$$L_{\text{totale}} = \frac{78,955}{(3,14)(0,0122)(21)}$$

$$L_{\text{totale}} = 71,444 \text{ m}$$

$$L_{\text{passage}} = \frac{L_{\text{totale}}}{N_{\text{passes}}} = \frac{98,146}{16}$$

$$L_{\text{passage}} = 4,465 \text{ m}$$

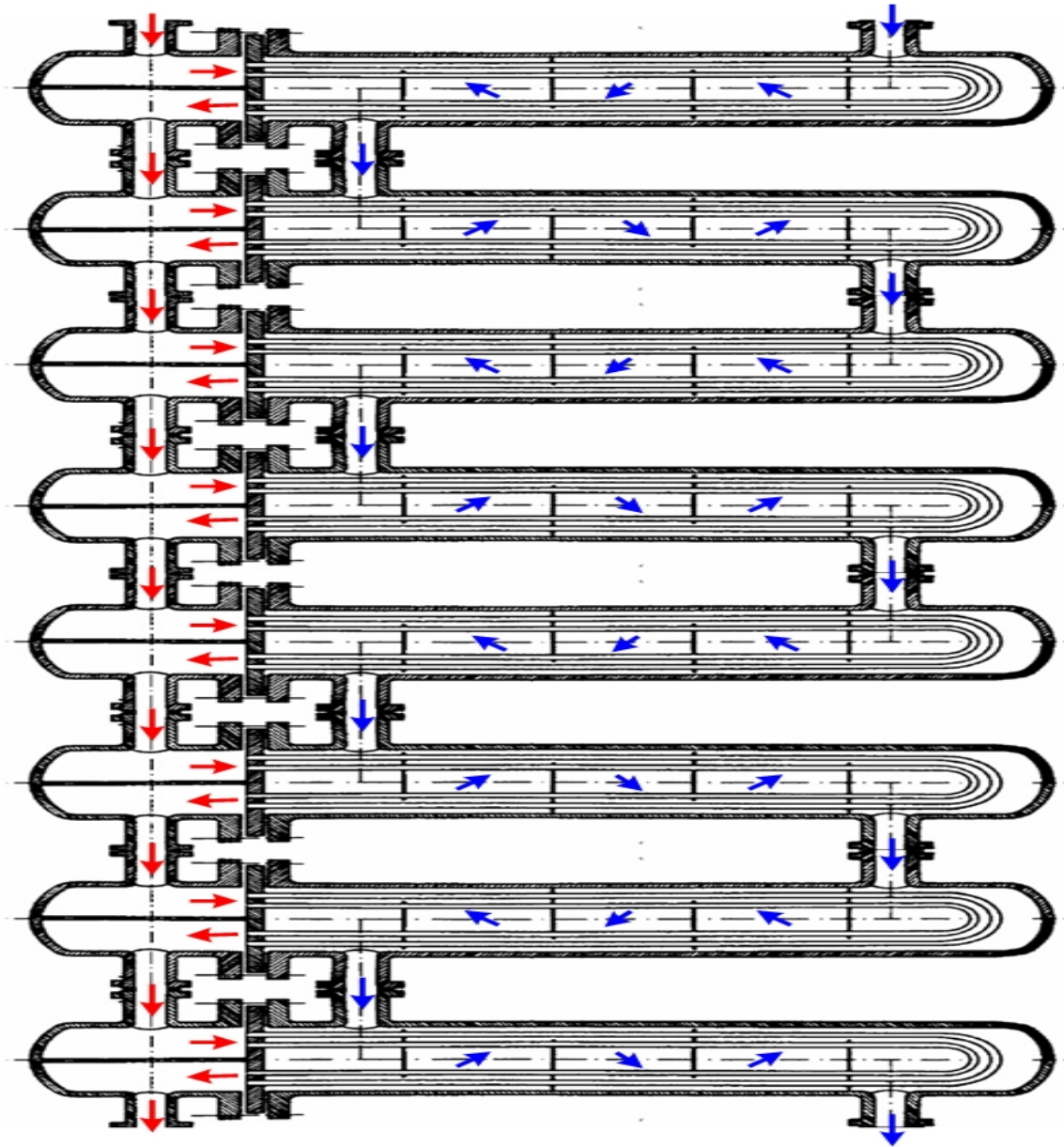


Figure. IV. 13 : Echangeur tubulaire E1 du cycle hélium à étranglement simple avec R.P

IV.6 Rapport entre l'efficacité de l'échangeur et le coefficient de liquéfaction de l'installation cryogénique

IV.6.1 Cycle à étranglement simple avec R.P

$$x = \frac{h_{10} - h_{11}' + q_{a3}}{h_f - h_{11}'}$$

$$\varepsilon = \frac{h_{11}' - h_5}{h_{11} - h_5}$$

$$h_{11}' = \varepsilon(h_{11} - h_5) + h_5$$

On introduit h_{11}' dans l'expression du coefficient de liquéfaction (x) :

$$x = \frac{h_{10} + q_{a3} - \varepsilon(h_{11} - h_5) - h_5}{h_f - \varepsilon(h_{11} - h_5) - h_5}$$

Pour une efficacité parfaite de l'échangeur $\varepsilon = 100\%$

$$x = \frac{109,3 + 0,279 - 1(118,6 - 30,691) - 30,691}{9,901 - 1(118,6 - 30,691) - 30,691}$$

$$x = 0,08299 = 8,29 \%$$

Pour une efficacité de l'échangeur $\varepsilon = 95 \%$

$$x = \frac{109,3 + 0,279 - 0,95(118,6 - 30,691) - 30,691}{9,901 - 0,95(118,6 - 30,691) - 30,691}$$

$$x = 0,0443 = 4,43 \%$$

Pour une efficacité de l'échangeur $\varepsilon = 90 \%$

$$x = \frac{109,3 + 0,279 - 0,9(118,6 - 30,691) - 30,691}{9,901 - 0,9(118,6 - 30,691) - 30,691}$$

$$x = 0,0023 = 0,23 \%$$

Résultat : la quantité de gaz liquéfiée est tributaire de l'efficacité de l'échangeur, plus cette efficacité est élevée, plus le coefficient de liquéfaction est important.

IV.6.2 cycle combiné

$$x = \frac{(1 - G)(h_6 - h_{10}' + q_{a4})}{(h_f - h_{10}')$$

$$\varepsilon = \frac{h_{10}' - h_9}{h_{10} - h_9}$$

$$h_{10}' = \varepsilon(h_{10} - h_9) + h_9$$

$$x = \frac{(1 - G)[h_6 - h_9 - \varepsilon(h_{10} - h_9)] + q_{a4}}{[h_f - h_9 - \varepsilon(h_{10} - h_9)]}$$

Pour une efficacité parfaite de l'échangeur $\varepsilon = 100\%$

$$x = \frac{(1 - 0,29)[45,2 - 30,69 - 1(65,52 - 30,69)] + 0,61}{[9,90 - 30,69 - 1(65,52 - 30,69)]}$$

$$x = 0,2471 = 24,7 \%$$

Chapitre IV. Dimensionnement des principaux organes de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'Hélium

Pour une efficacité de l'échangeur $\varepsilon = 95 \%$

$$x = \frac{(1 - 0,29)[45,2 - 30,69 - 0,95(65,52 - 30,69)] + 0,61}{[9,90 - 30,69 - 0,95(65,52 - 30,69)]}$$

$$x = 0,2322 = 23,22 \%$$

Pour une efficacité de l'échangeur $\varepsilon = 90 \%$

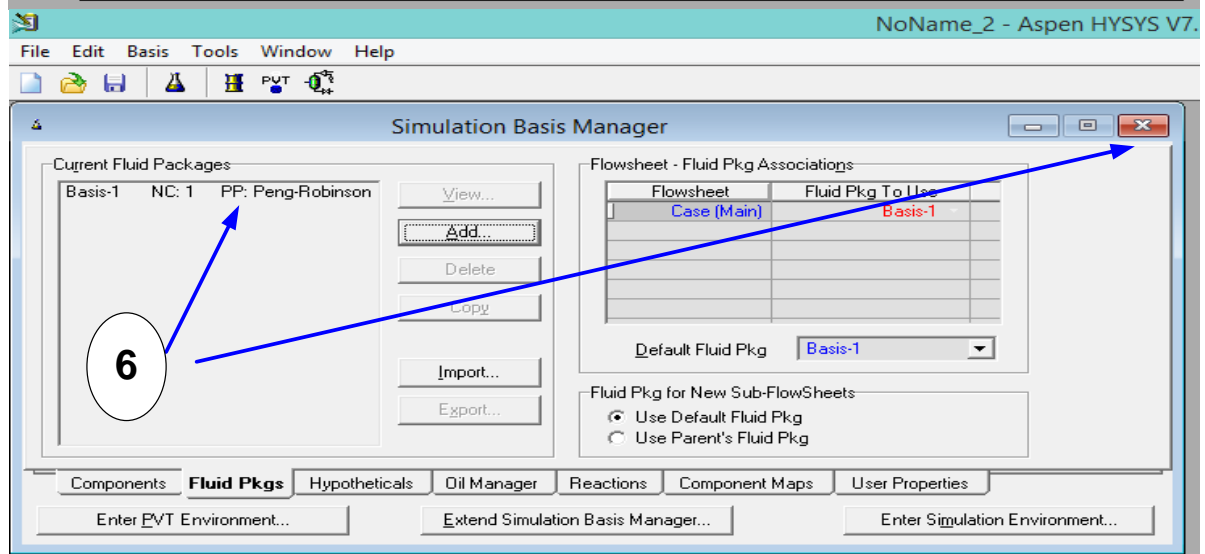
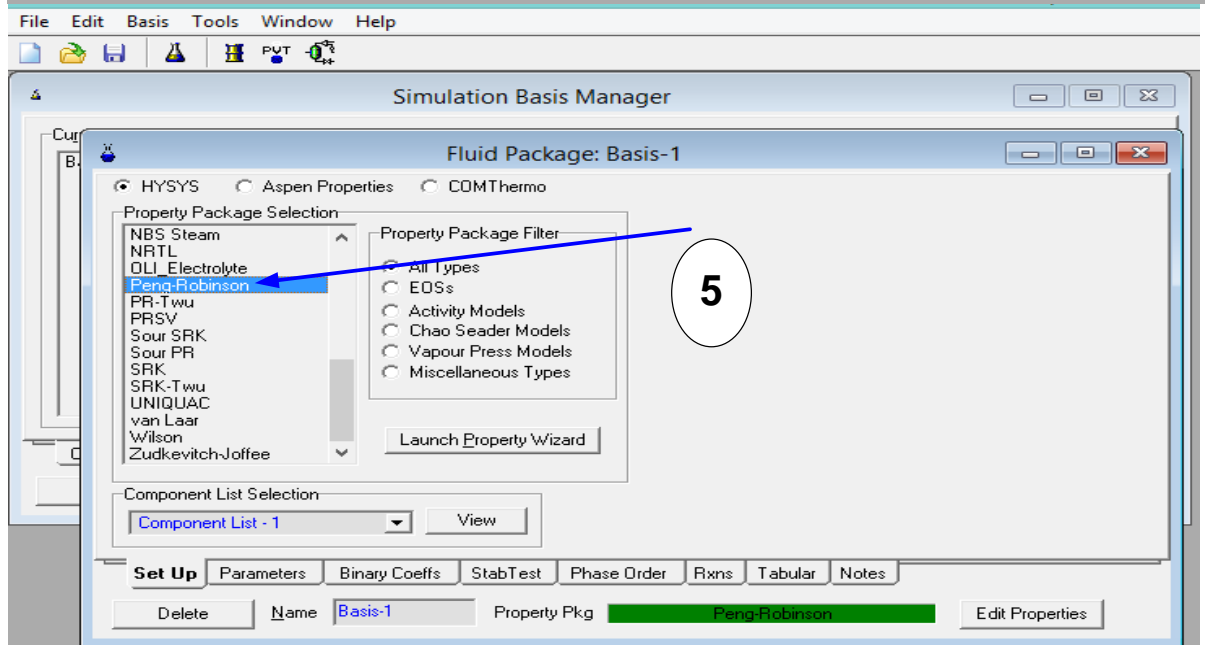
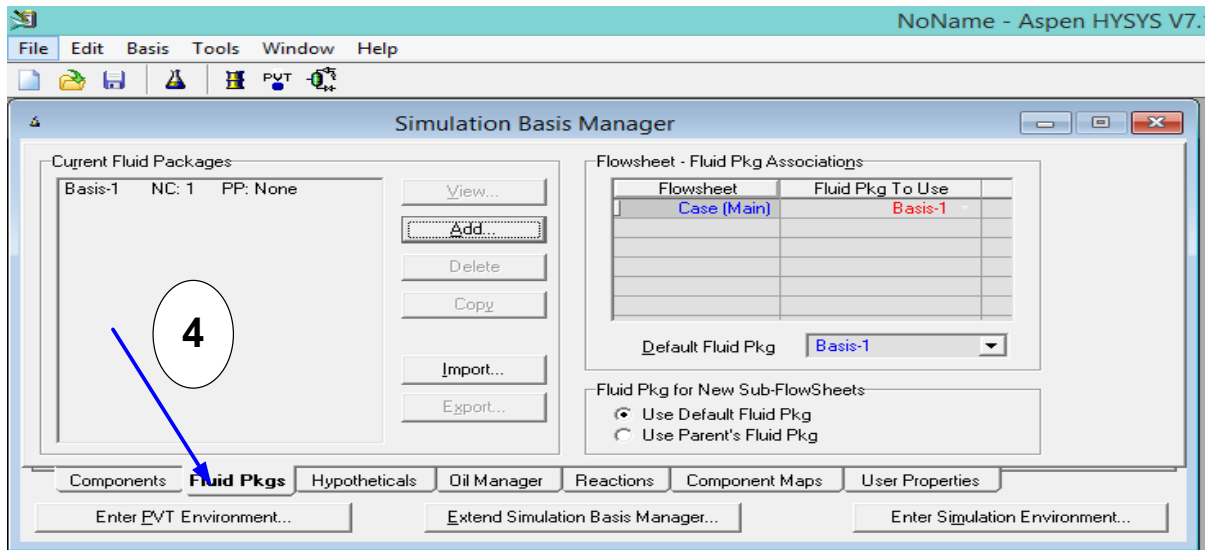
$$x = \frac{(1 - 0,29)[45,2 - 30,69 - 0,9(65,52 - 30,69)] + 0,61}{[9,90 - 30,69 - 0,9(65,52 - 30,69)]}$$

$$x = 0,2164 = 21,64 \%$$

Résultat : La quantité de gaz liquéfiée est tributaire de l'efficacité de l'échangeur, plus cette efficacité est élevée, plus le coefficient de liquéfaction est important.

NB : Le détendeur permet la compensation de l'inefficacité de l'échangeur.

Chapitre V. Simulation des cycles cryogéniques de la liquéfaction de l'Hélium en utilisant le logiciel HYSYS v7.1



Chapitre V. Simulation des cycles cryogéniques de la liquéfaction de l'Hélium en utilisant le logiciel HYSYS v7.1

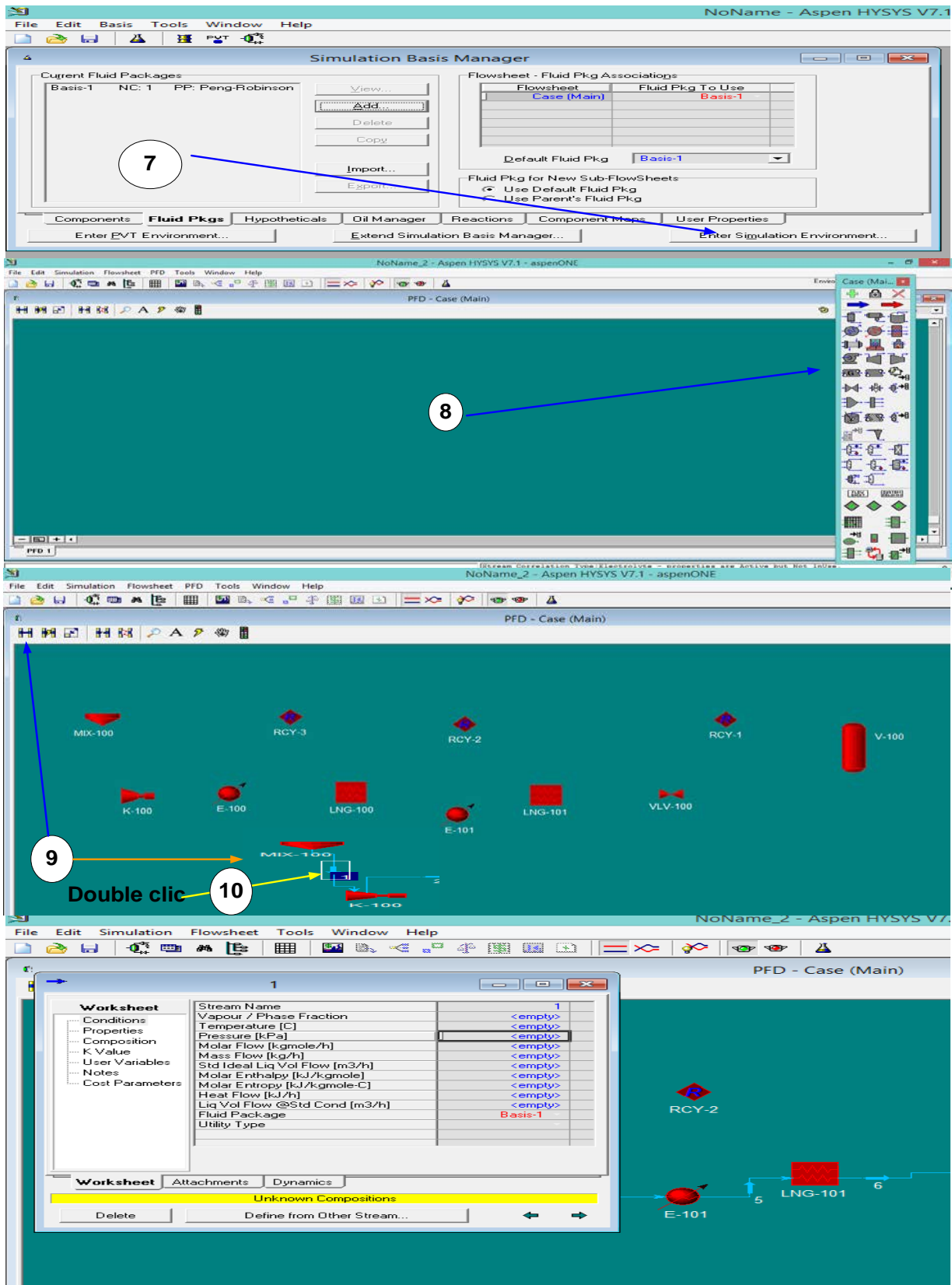


Figure. V. 1 : Représentation des dix premières étapes à suivre pour la simulation des cycles cryogéniques de la liquéfaction

Une fois ces dix étapes réalisées, il sera nécessaire d'entrer :

- Les pressions de l'ensemble des points figuratifs du cycle cryogénique de l'installation (après avoir relié tous les composants de l'installation).
- Le débit et la composition chimique du gaz au point (1) entrée du cycle (la composition = 1 pour un gaz pur à 100%).
- Les températures de l'ensemble des points figuratifs du cycle cryogénique de l'installation (du point 1 jusqu'au dernier point de l'écoulement « aller »).

V.2. Liquéfaction de l'azote T=77K

Pour le refroidissement préalable de l'hélium, l'azote utilisé doit être à l'état liquide et sa liquéfaction peut être effectuée soit par des « cycles à étranglement simple » (pouvant être améliorés par des « cycles avec refroidissement préalable ») soit par des « cycles combinés » afin d'obtenir un rendement optimal.

V.2.1 Cycle à étranglement simple pour la liquéfaction de l'azote

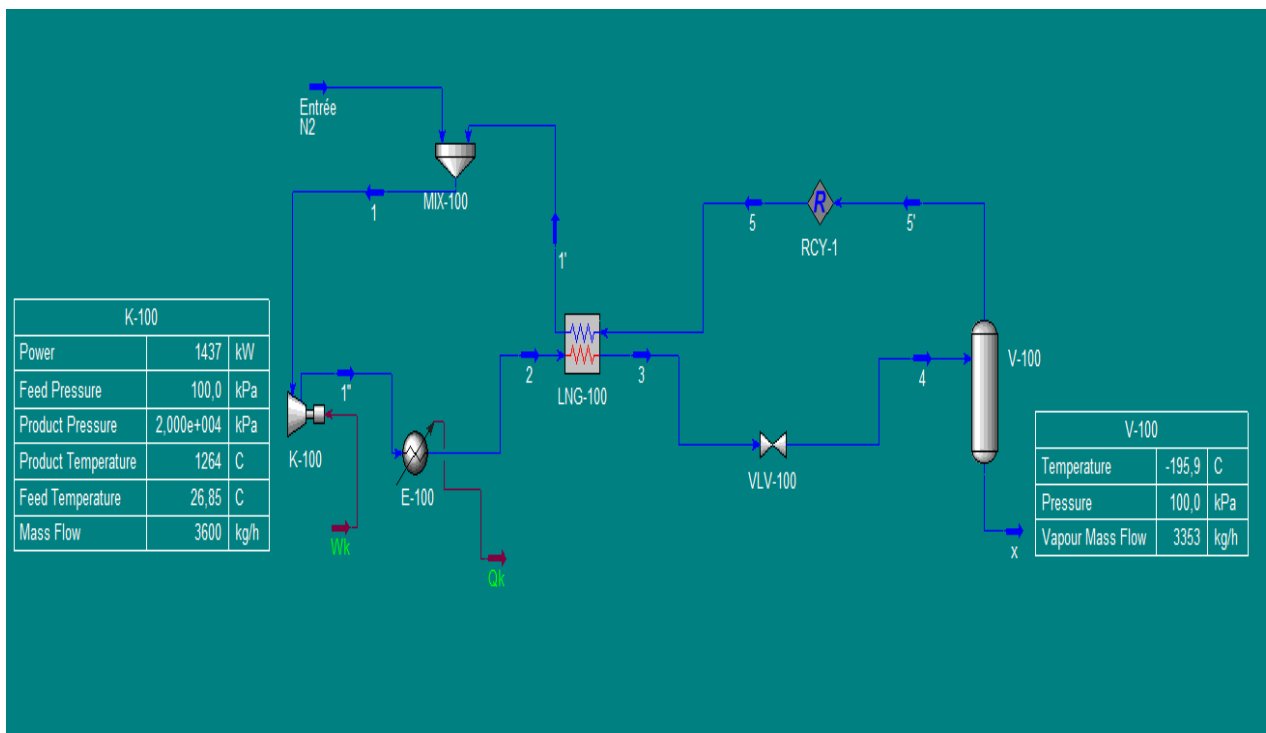


Figure. V. 2 : Installation du cycle à ES pour la liquéfaction de l'azote avec $P_2=200$ bars

Le coefficient de liquéfaction x est :

$$\dot{m}_f = (1 - x)\dot{m}_c$$

$$x = \frac{\dot{m}_c - \dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{3353}{3600}$$

$$x = 0,0686 = 6,86\%$$

Tableau V.1 : Points figuratifs du cycle à ES pour la liquéfaction de l'azote avec $P_2=200$ bars

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		100	26,85	3600	4,46443	1	46,344
1"		20000	1264,48	3600	4,46443	1	40304,4
2		20000	26,85	3600	4,46443	1	-959,814
3		20000	-105,15	3600	4,46443	1	-6751,24
4		100	-195,914	3600	4,46443	0,931458	-6751,24
x		100	-195,914	246,752	0,306002	0	-11930,8
5'		100	-195,914	3353,25	4,15843	1	-6370,1
5		100	-195,914	3353,25	4,15843	1	-6370,1
1'		100	20,0365	3353,25	4,15843	1	-152,507
Entrée N2		100	118,669	246,752	0,306002	1	2748,64

V.2.2. Cycle à étranglement simple avec refroidissement préalable utilisant un fluide frigorigère (à $T=230K$) pour la liquéfaction de l'azote

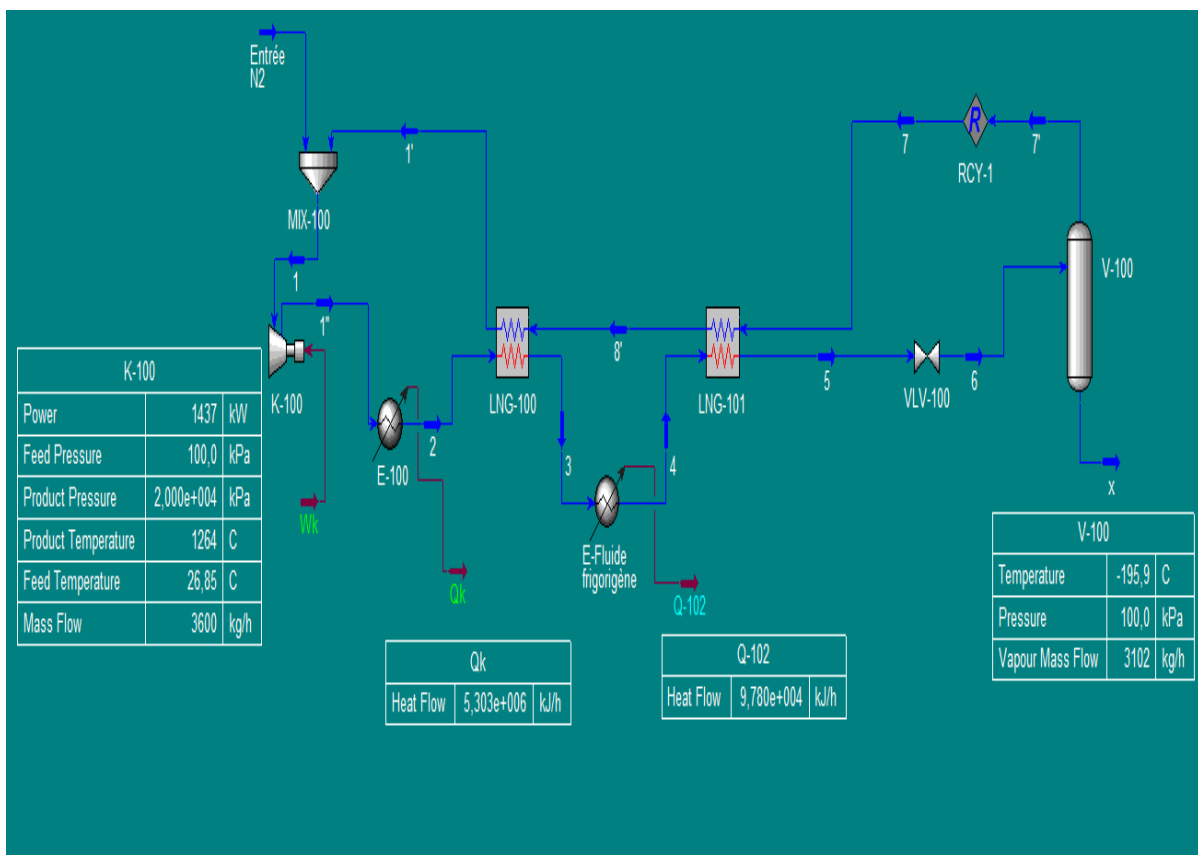


Figure. V. 3 : Installation du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'azote avec $P_2=200$ bars

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - x)\dot{m}_c$$

$$x = 1 - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{3102}{3600}$$

$$x = 0,1383 = 13,83$$

Tableau V.2 : Points figuratifs du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'azote avec $P_2=200$ bars

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		100	26,85	3600	4,46443	1	46,344
1"		20000	1264,48	3600	4,46443	1	40304,4
2		20000	26,85	3600	4,46443	1	-959,814
3		20000	-25	3600	4,46443	1	-2955,31
4		20000	-43,15	3600	4,46443	1	-3716,32
5		20000	-112,15	3600	4,46443	1	-7138,75
6		100	-195,913	3600	4,46443	0,861759	-7138,75
x		100	-195,913	497,666	0,617165	0	-11930,7
7		100	-195,913	3102,33	3,84726	1	-6370,05
7		100	-195,913	3102,33	3,84726	1	-6370,05
8'		100	-57,4558	3102,33	3,84726	1	-2398,6
1'		100	22,4193	3102,33	3,84726	1	-82,9906
Entrée N2		100	54,3952	497,666	0,617165	1	852,585

V.2.3. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec branchement du détendeur au niveau initial à T=300K

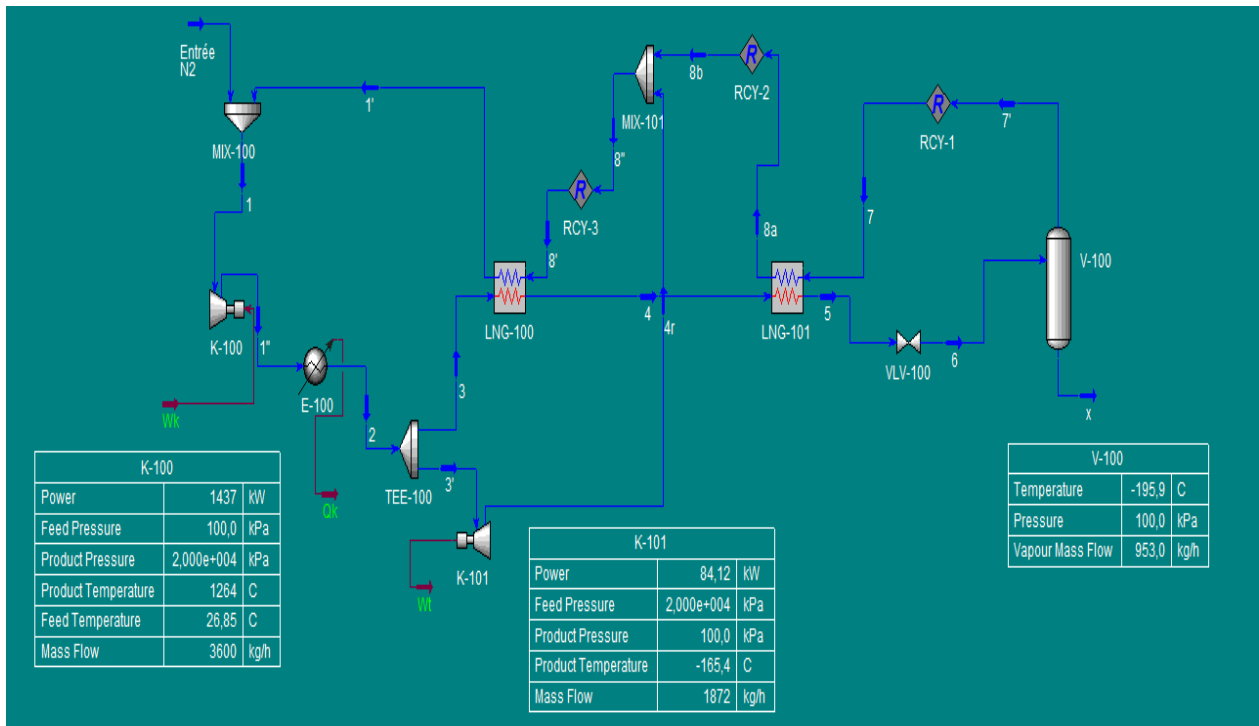


Figure. V. 4 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau initial de température et un taux de détente $T=200$

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - G - x)\dot{m}_c$$

$$x = (1 - G) - \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c}\right) = (1 - 0,52) - \left(\frac{953}{3600}\right)$$

$$x = 0,2153 = 21,53\%$$

Tableau V.3 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau initial de température et un taux de détente $T=200$

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		100	26,85	3600	4,46443	1	46,344
1"		20000	1264,48	3600	4,46443	1	40304,4
2		20000	26,85	3600	4,46443	1	-959,814
3		20000	26,85	1728	2,14293	1	-959,814
4		20000	-125,15	1728	2,14293	0	-7866,71
5		20000	-143,15	1728	2,14293	0	-8864,09
6		100	-195,914	1728	2,14293	0,551494	-8864,09
x		100	-195,914	775,018	0,961115	0	-11930,8
3'		20000	26,85	1872	2,3215	1	-959,814
4r		100	-165,401	1872	2,3215	1	-5491,26
7		100	-195,914	952,982	1,18181	1	-6370,1
7		100	-195,914	952,982	1,18181	1	-6370,1
8a		100	-132,887	952,982	1,18181	1	-4561,6
8b		100	-132,887	952,982	1,18181	1	-4561,6
8"		100	-154,44	2824,98	3,50331	1	-5177,64
8'		100	-154,44	2824,98	3,50331	1	-5177,64
1'		100	-7,46321	2824,98	3,50331	1	-952,795
Entrée N2		100	150,261	775,018	0,961115	1	3688,25

V.2.4. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec refroidissement préalable pour un branchement du détendeur au niveau intermédiaire à T=230K

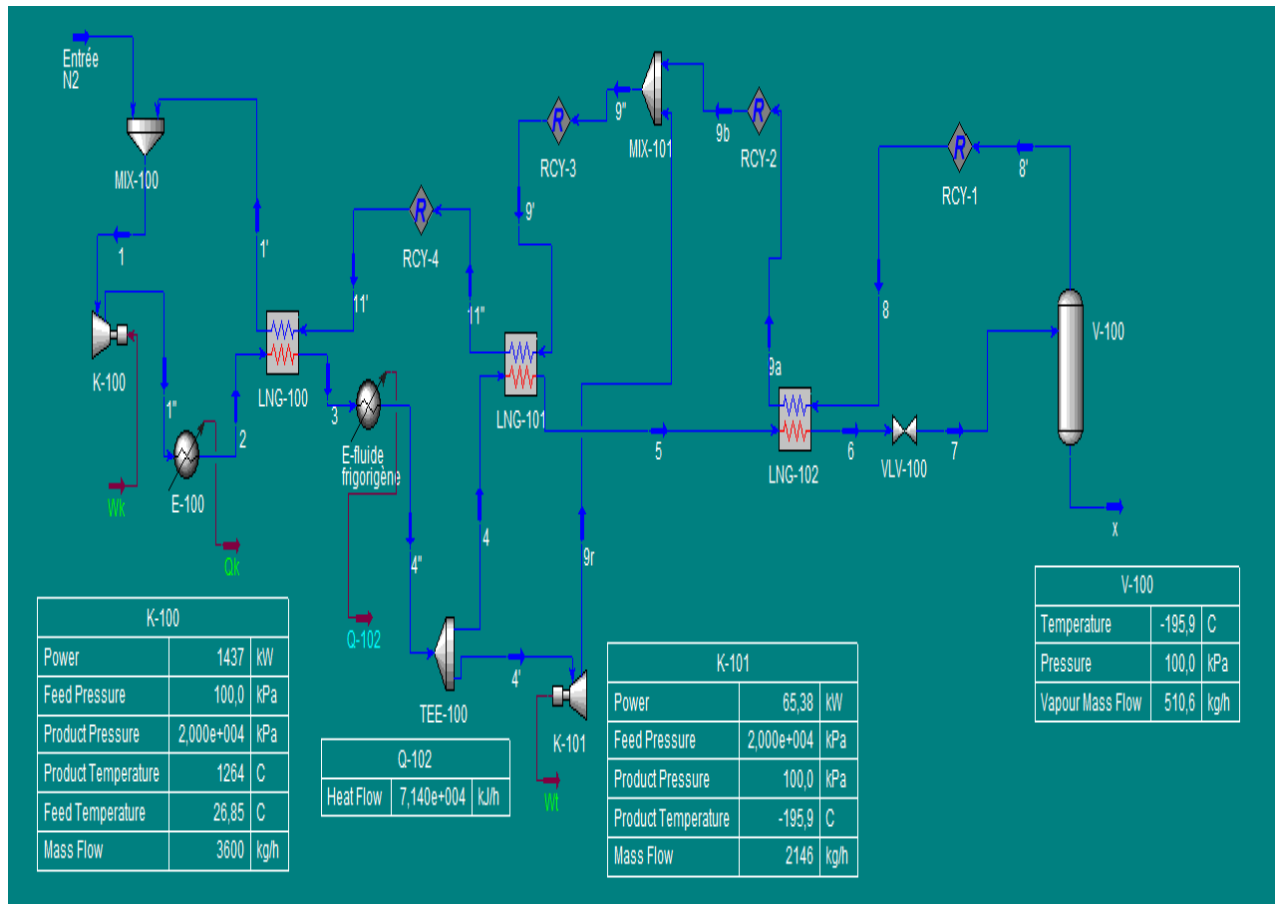


Figure. V. 5 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau intermédiaire de température et un taux de détente $T=200$

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - G - x)\dot{m}_c$$

$$x = (1 - G) - \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c}\right) = (1 - 0,596) - \left(\frac{510,6}{3600}\right)$$

$$x = 0,2622 = 26,22\%$$

Tableau V.4 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau intermédiaire de température et un taux de détente $T=200$

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		100	26,85	3600	4,46443	1	46,344
1"		20000	1264,48	3600	4,46443	1	40304,4
2		20000	26,85	3600	4,46443	1	-959,814
3		20000	-30	3600	4,46443	1	-3160,76
4"		20000	-43,15	3600	4,46443	1	-3716,32
4		20000	-43,15	1454	1,80313	1	-3716,32
5		20000	-157,15	1454	1,80313	0	-9613,57
6		20000	-164,15	1454	1,80313	0	-9977,98
7		100	-195,915	1454	1,80313	0,351181	-9977,98
x		100	-195,915	943,383	1,16991	0	-11930,8
4'		20000	-43,15	2146	2,6613	1	-3716,32
9r		100	-195,915	2146	2,6613	0,924731	-6788,65
8'		100	-195,915	510,617	0,633226	1	-6370,11
8		100	-195,915	510,617	0,633226	1	-6370,11
9a		100	-159,852	510,617	0,633226	1	-5332,44
9b		100	-159,852	510,617	0,633226	1	-5332,44
9"		100	-195,916	2656,62	3,29452	0,975072	-6508,76
9'		100	-195,916	2656,62	3,29452	0,975072	-6508,76
11"		100	-88,1548	2656,62	3,29452	1	-3281,12
11'		100	-88,1548	2656,62	3,29452	1	-3281,12
1'		100	15,0257	2656,62	3,29452	1	-298,604
Entrée N2		100	60,0217	943,383	1,16991	1	1017,74

V.2.5. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec refroidissement préalable à 230K pour un branchement du détendeur à un niveau intermédiaire à T=160K

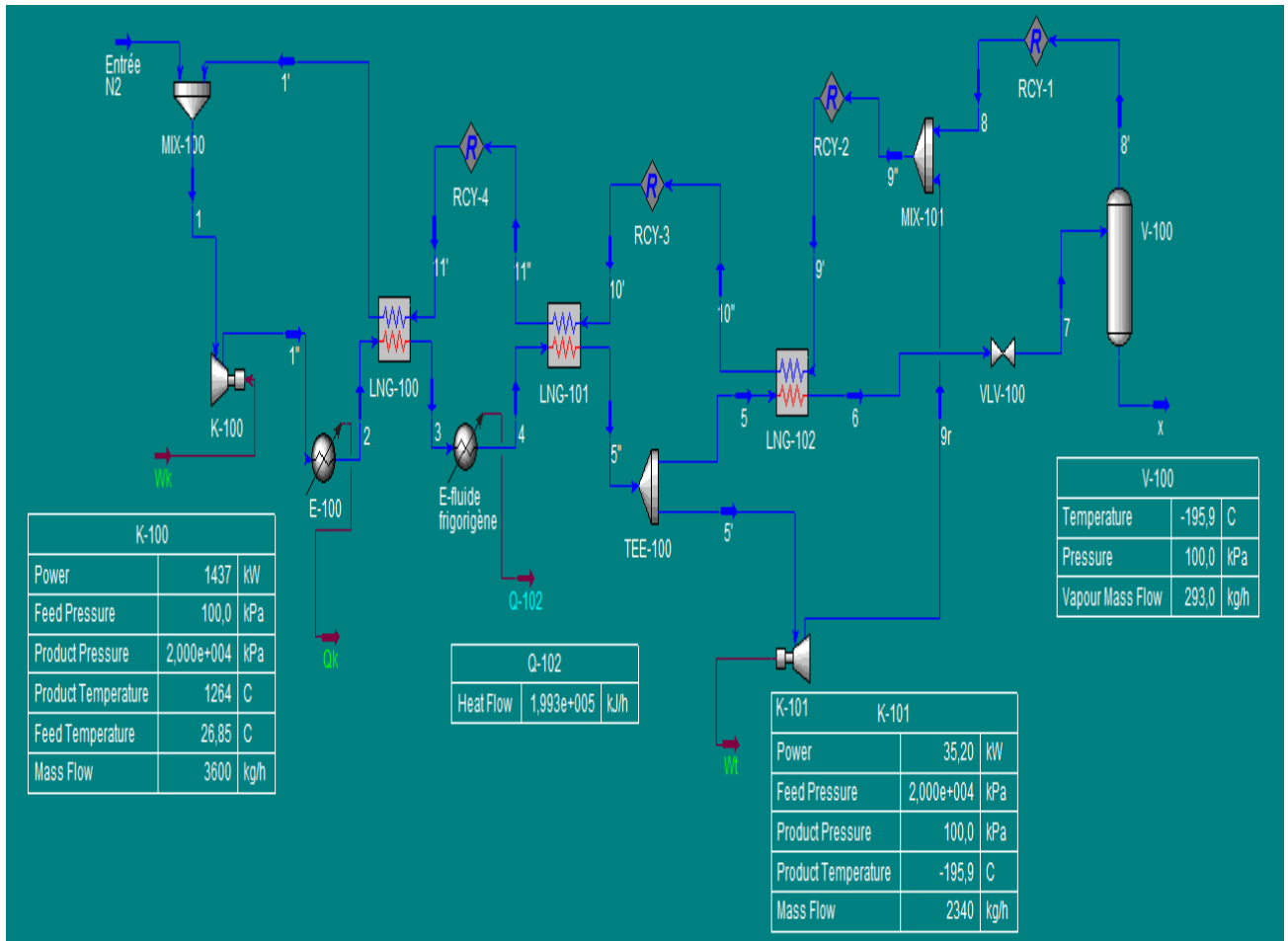


Figure. V. 6 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau inférieur de température et un taux de détente $\tau=200$

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - G - x)\dot{m}_c$$

$$x = (1 - G) - \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c}\right) = (1 - 0,654) - \left(\frac{293}{3600}\right)$$

$$x = 0,2646 = 26,46\%$$

Tableau V.5 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'azote avec un branchement du détendeur au niveau inférieur de température et un taux de détente $T=200$

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		100	26,85	3600	4,46443	1	46,344
1"		20000	1264,48	3600	4,46443	1	40304,4
2		20000	26,85	3600	4,46443	1	-959,814
3		20000	-5,15	3600	4,46443	1	-2165,72
4		20000	-43,15	3600	4,46443	1	-3716,32
5"		20000	-113,15	3600	4,46443	1	-7194,5
5		20000	-113,15	1260	1,56255	1	-7194,5
6		20000	-177,15	1260	1,56255	0	-10637,6
7		100	-195,914	1260	1,56255	0,232557	-10637,6
x		100	-195,914	966,978	1,19917	0	-11930,7
5'		20000	-113,15	2340	2,90188	1	-7194,5
9r		100	-195,915	2340	2,90188	0,578962	-8711,37
8'		100	-195,914	293,022	0,363383	1	-6370,08
8		100	-195,914	293,022	0,363383	1	-6370,08
9"		100	-195,915	2633,02	3,26526	0,625817	-8450,81
9'		100	-195,915	2633,02	3,26526	0,625817	-8450,81
10"		100	-195,912	2633,02	3,26526	0,922105	-6803,18
10'		100	-195,912	2633,02	3,26526	0,922105	-6803,18
11"		100	-45,2845	2633,02	3,26526	1	-2047,63
11'		100	-45,2845	2633,02	3,26526	1	-2047,63
1'		100	11,5849	2633,02	3,26526	1	-398,854
Entrée N2		100	68,2177	966,978	1,19917	1	1258,59

V.3. Liquéfaction de l'hydrogène T=20K

Pour le refroidissement préalable de l'hélium, l'hydrogène utilisé doit être à l'état liquide et sa liquéfaction peut être effectuée soit par des « cycles à étranglement simple avec refroidissement préalable » soit par des « cycles combinés » afin d'obtenir un rendement optimal.

V.3.1. Cycle à étranglement simple avec deux étages de refroidissement préalable (utilisant de l'azote liquide saturé à la pression atmosphérique à 80K et de l'azote sous vide 65K pour la liquéfaction de l'hydrogène

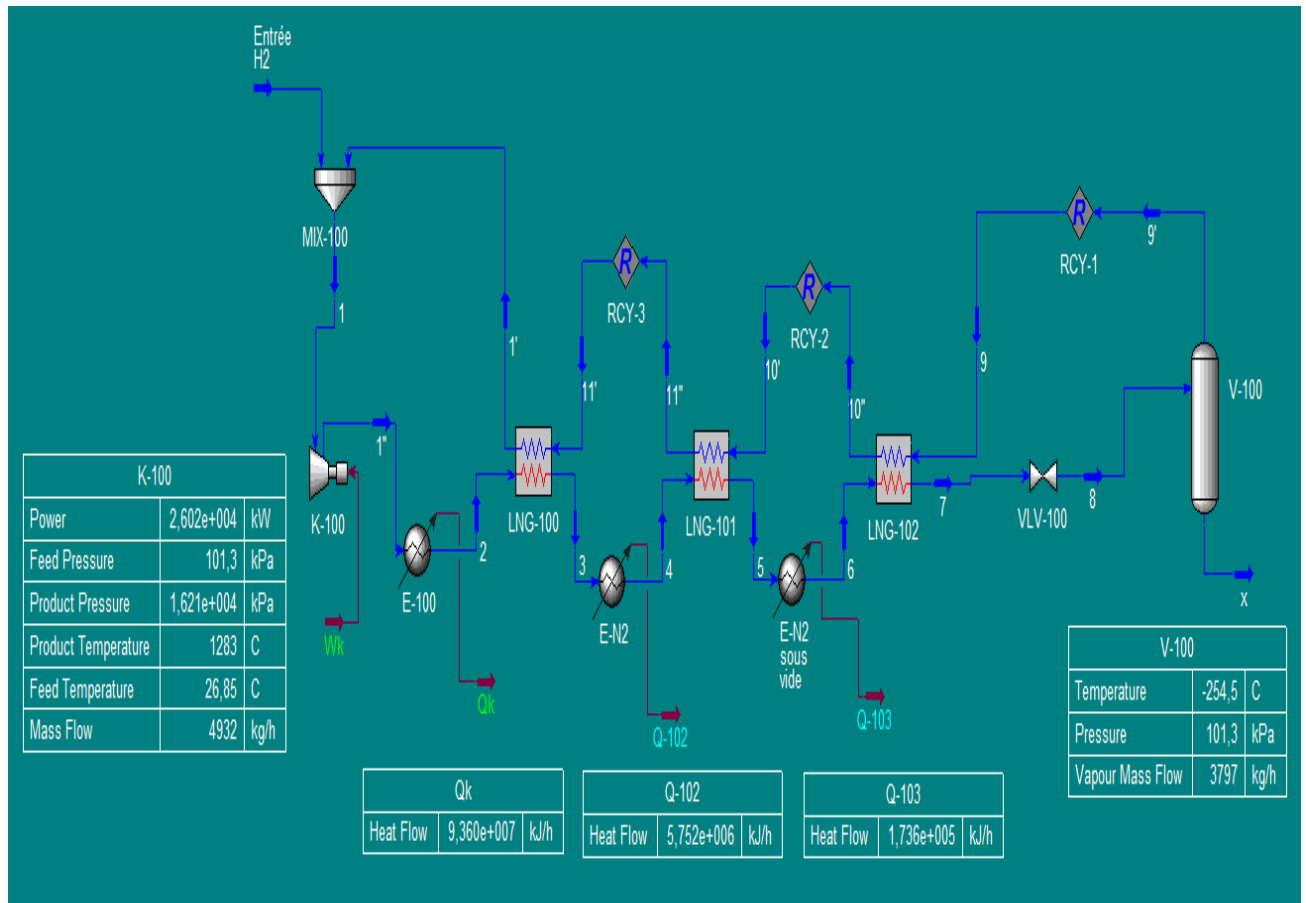


Figure. V. 7 : Installation du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hydrogène avec $P_2=160\text{atm}$

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - x)\dot{m}_c$$

$$x = \frac{\dot{m}_c - \dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{3780}{4932}$$

$$x = 0,2336 = 23,36\%$$

Tableau V.6 : Points figuratifs du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hydrogène avec

$$P_2 = 160\text{atm}$$

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		101,325	26,85	4932	70,5992	1	52,4913
1"		16212	1283,28	4932	70,5992	1	38340,1
2		16212	26,85	4932	70,5992	1	81,9708
3		16212	-121,65	4932	70,5992	1	-4354,87
4		16212	-193,15	4932	70,5992	1	-6705,87
5		16212	-206,15	4932	70,5992	1	-7166,44
6		16212	-208,15	4932	70,5992	1	-7237,4
7		16212	-234,45	4932	70,5992	1	-8113,65
8		101,325	-254,46	4932	70,5992	0,769834	-8113,65
x		101,325	-254,46	1135,18	16,2496	0	-8806,48
9'		101,325	-254,46	3796,82	54,3497	1	-7906,51
9		101,325	-254,458	3780,46	54,1154	1	-7906,44
10"		101,325	-214,606	3780,46	54,1154	1	-6763,29
10'		101,325	-214,606	3780,46	54,1154	1	-6763,29
11"		101,325	-193,267	3780,46	54,1154	1	-6162,42
11'		101,325	-193,267	3780,46	54,1154	1	-6162,42
1'		101,325	11,8388	3780,46	54,1154	1	-374,099
Entrée H2		101,325	76,0063	1151,54	16,4838	1	1452,96

V.3.2. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'hydrogène avec un étage de refroidissement préalable utilisant de l'azote avec un branchement du détendeur à T=80K

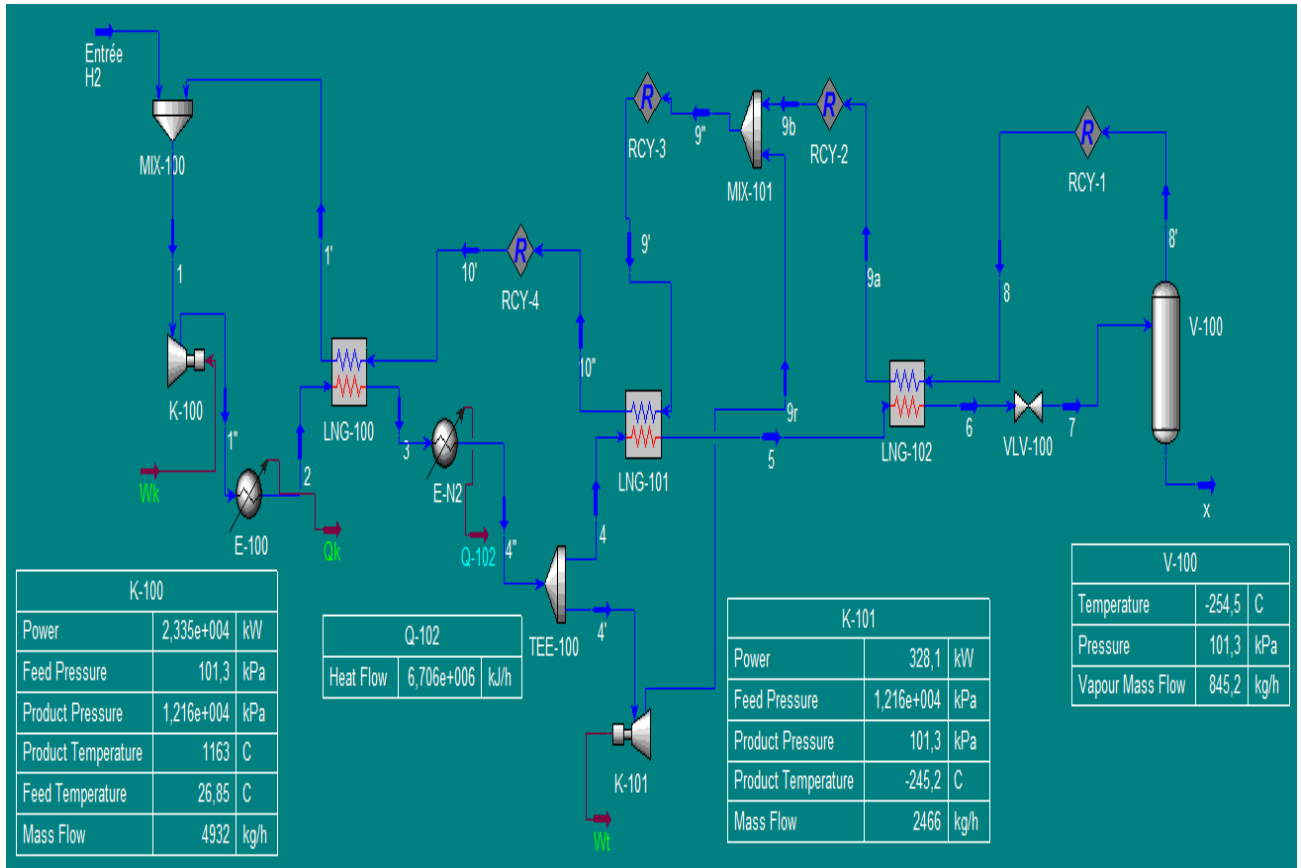


Figure. V. 8 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hydrogène avec un branchement du détendeur au niveau intermédiaire de température et un taux de détente $\tau=120$

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - G - x)\dot{m}_c$$

$$x = (1 - G) - \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c}\right) = (1 - 0,50) - \left(\frac{845,2}{4932}\right)$$

$$x = 0,3286 = 32,86\%$$

Tableau V.7 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hydrogène avec un branchement du détendeur au niveau intermédiaire de température et un taux de détente $T=120$

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		101,325	26,85	4932	70,5992	1	52,4913
1"		12159	1162,8	4932	70,5992	1	34408,9
2		12159	26,85	4932	70,5992	1	67,2963
3		12159	-108,4	4932	70,5992	1	-3926,58
4"		12159	-193,15	4932	70,5992	1	-6667,7
4		12159	-193,15	2466	35,2996	1	-6667,7
5		12159	-242,15	2466	35,2996	0	-8376,74
6		12159	-247,15	2466	35,2996	0	-8497,97
7		101,325	-254,457	2466	35,2996	0,342724	-8497,97
x		101,325	-254,457	1620,84	23,2016	0	-8806,42
4'		12159	-193,15	2466	35,2996	1	-6667,7
9r		101,325	-245,197	2466	35,2996	1	-7633,21
8'		101,325	-254,457	845,156	12,098	1	-7906,42
8		101,325	-254,457	845,156	12,098	1	-7906,42
9a		101,325	-242,407	845,156	12,098	1	-7552,69
9b		101,325	-242,407	845,156	12,098	1	-7552,69
9"		101,325	-244,486	3311,16	47,3976	1	-7612,66
9'		101,325	-244,486	3311,16	47,3976	1	-7612,66
10"		101,325	-199,573	3311,16	47,3976	1	-6339,84
10'		101,325	-199,573	3311,16	47,3976	1	-6339,84
1'		101,325	11,2467	3311,16	47,3976	1	-390,916
Entrée H2		101,325	58,6662	1620,84	23,2016	1	958,31

V.4. Cycles cryogéniques pour la liquéfaction de l'hélium

V.4.1. Cycle à étranglement simple avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote liquide saturé à 80K et de l'hydrogène liquide à 20K pour la liquéfaction de l'hélium

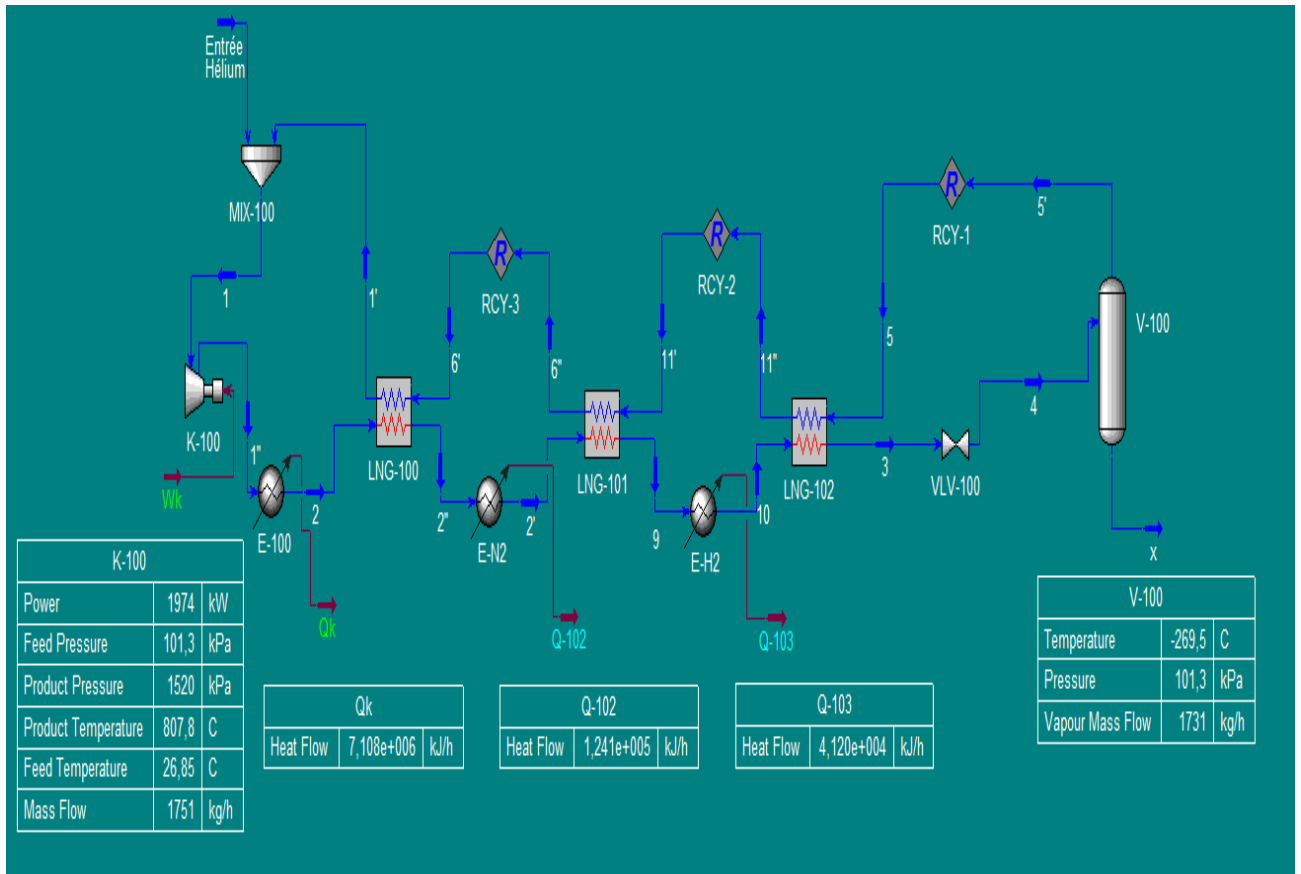


Figure. V. 9 : Installation du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec $P_2 = 15\text{atm}$

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - x)\dot{m}_c$$

$$x = \frac{\dot{m}_c - \dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{1730,9}{1751}$$

$$x = 0,01148 = 1,15\%$$

Tableau V.8 : Points figuratifs du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec

$P_2 = 15\text{atm}$

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		101,325	26,85	1751	14,1137	1	38,1913
1"		1519,87	807,824	1751	14,1137	1	16284,5
2		1519,87	26,85	1751	14,1137	1	34,4731
2"		1520	-179,65	1751	14,1137	1	-4274,61
2'		1520	-193,15	1751	14,1137	1	-4558,36
9		1520	-249,15	1751	14,1137	1	-5764,2
10		1520	-253,15	1751	14,1137	1	-5858,4
3		1520	-265,5	1751	14,1137	0	-6150,54
4		101,325	-269,503	1751	14,1137	0,988498	-6150,54
x		101,325	-269,503	20,1395	0,162331	0	-6203,84
5'		101,325	-269,503	1730,86	13,9514	1	-6149,92
5		101,325	-269,503	1730,86	13,9514	1	-6149,92
11"		101,325	-256,189	1730,86	13,9514	1	-5854,38
11'		101,325	-256,189	1730,86	13,9514	1	-5854,38
6"		101,325	-197,75	1730,86	13,9514	1	-4634,51
6'		101,325	-197,75	1730,86	13,9514	1	-4634,51
1'		101,325	11,7792	1730,86	13,9514	1	-275,291
Entrée Hélium		101,325	1322,18	20,1395	0,162331	1	26980

Pour obtenir de meilleurs résultats, on augmente la pression à $P_2 = 20\text{atm}$

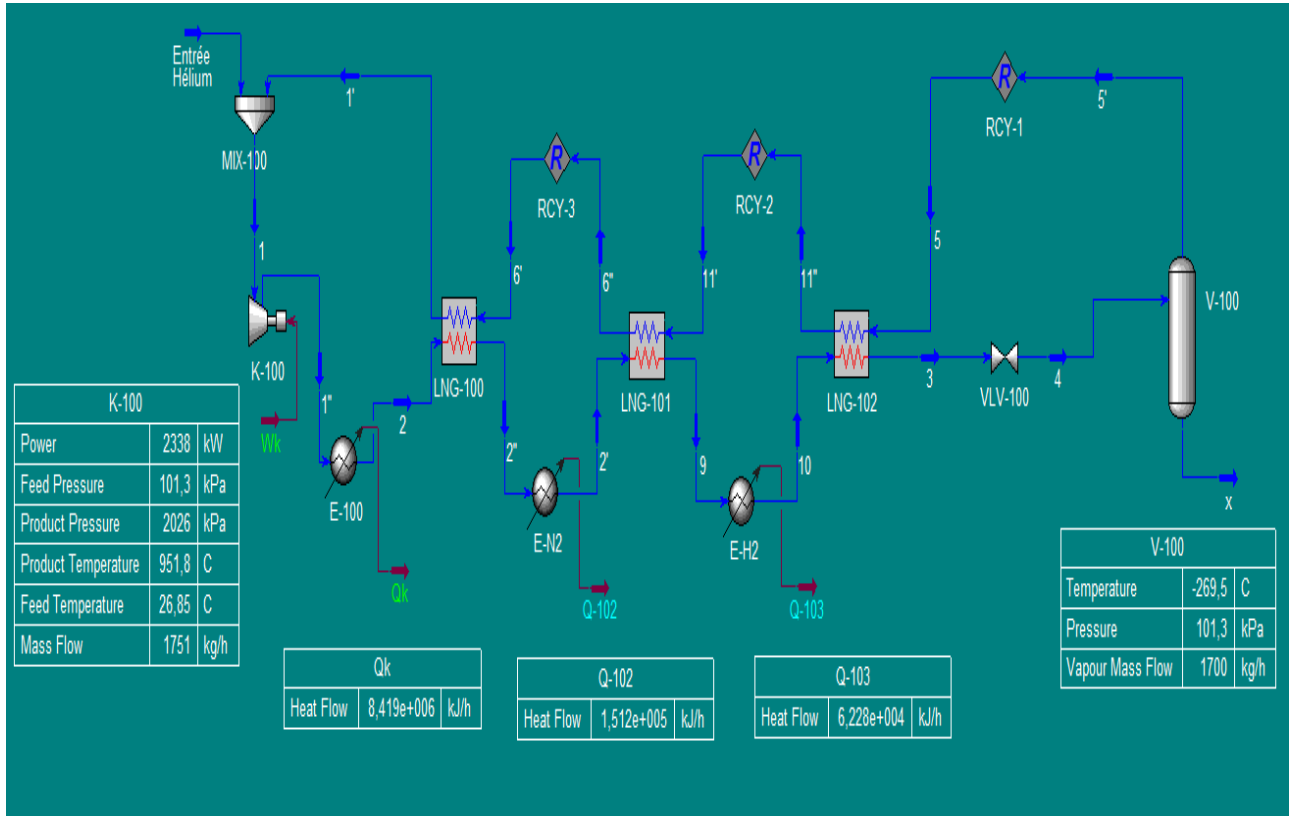


Figure. V. 10 : Installation du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec $P_2 = 20\text{atm}$

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - x)\dot{m}_c$$

$$x = \frac{\dot{m}_c - \dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{1699,63}{1751}$$

$$x = 0,0293 = 2,93\%$$

Chapitre V. Simulation des cycles cryogéniques de la liquéfaction de l'Hélium en utilisant le logiciel HYSYS v7.1

Tableau V.9 : Points figuratifs du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec $P_2 = 20\text{atm}$

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		101,325	26,85	1751	14,1137	1	38,1913
1"		2026,5	951,784	1751	14,1137	1	19280,2
2		2026,5	26,85	1751	14,1137	1	33,2751
2"		2026	-176,75	1751	14,1137	1	-4219,02
2'		2026	-193,15	1751	14,1137	1	-4564,64
9		2026	-247,15	1751	14,1137	1	-5734,02
10		2026	-253,15	1751	14,1137	1	-5876,4
3		2026	-265,81	1751	14,1137	1	-6151,53
4		101,325	-269,503	1751	14,1137	0,970662	-6151,53
x		101,325	-269,503	51,3715	0,414072	0	-6203,86
5'		101,325	-269,503	1699,63	13,6996	1	-6149,95
5		101,325	-269,503	1699,63	13,6996	1	-6149,95
11"		101,325	-256,763	1699,63	13,6996	1	-5866,5
11'		101,325	-256,763	1699,63	13,6996	1	-5866,5
6"		101,325	-199,06	1699,63	13,6996	1	-4661,79
6'		101,325	-199,06	1699,63	13,6996	1	-4661,79
1'		101,325	11,5066	1699,63	13,6996	1	-280,962
Entrée Hélium		101,325	534,517	51,3715	0,414072	1	10597,4

Chapitre V. Simulation des cycles cryogéniques de la liquéfaction de l'Hélium en utilisant le logiciel HYSYS v7.1

Pour ce cycle, l'installation de base est préservée et la pression augmente jusqu'à atteindre un maximum de 25 atm.

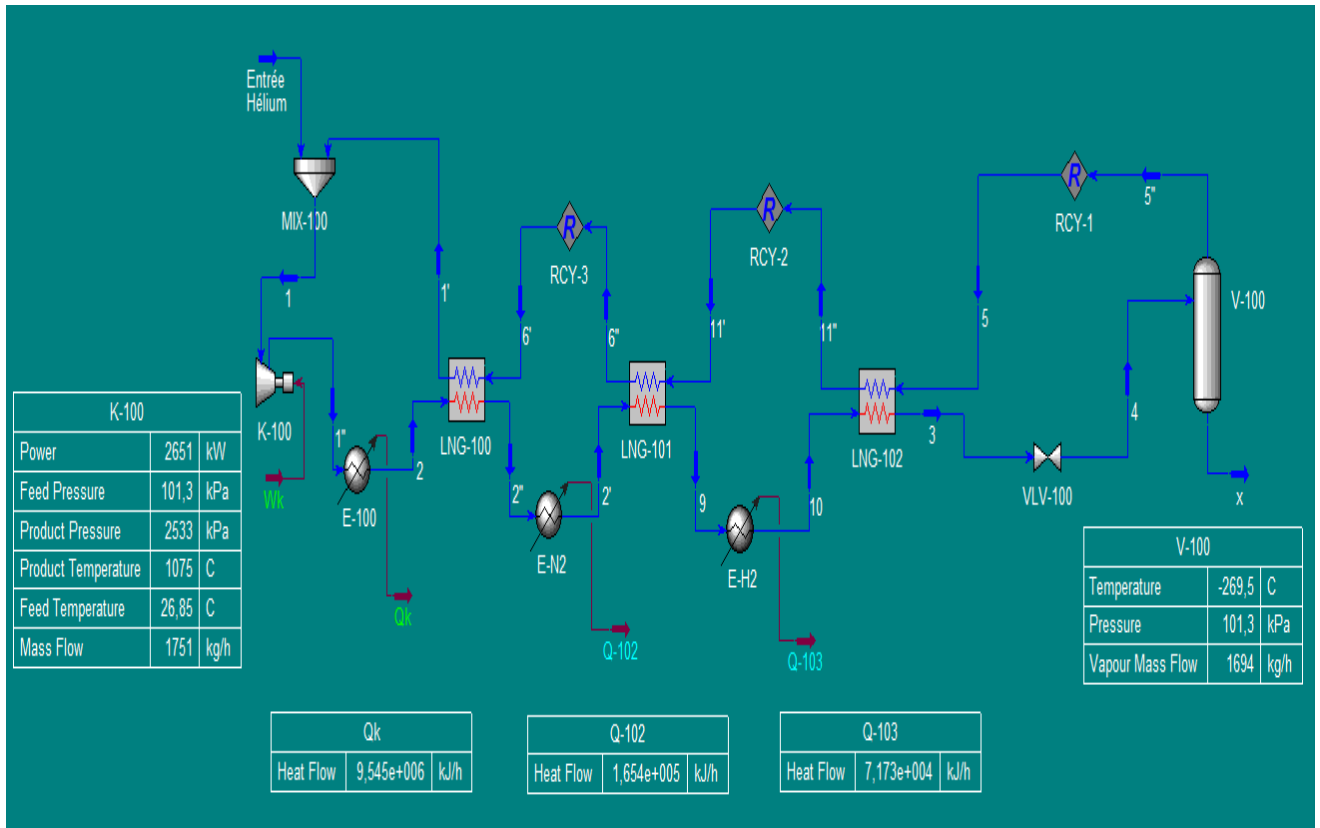


Figure. V. 11 : Installation du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec $P_2=25\text{atm}$

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - x)\dot{m}_c$$

$$x = \frac{\dot{m}_c - \dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c} = 1 - \frac{1694,09}{1751}$$

$$x = 0,0325 = 3,25\%$$

Tableau V.10 : Points figuratifs du cycle à ES+RP pour la liquéfaction de l'hélium avec

$P_2 = 25\text{atm}$

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		101,325	26,85	1751	14,1137	1	38,1913
1"		2533,12	1075,43	1751	14,1137	1	21853,4
2		2533	26,85	1751	14,1137	1	32,1448
2"		2533	-175,25	1751	14,1137	1	-4192,4
2		2533	-193,15	1751	14,1137	1	-4570,56
9		2533	-246,22	1751	14,1137	1	-5725,55
10		2533	-253,15	1751	14,1137	1	-5889,53
3		2533	-266,25	1751	14,1137	1	-6151,73
4		101,325	-269,504	1751	14,1137	0,9675	-6151,73
x		101,325	-269,504	56,9068	0,458689	0	-6203,87
5"		101,325	-269,504	1694,09	13,655	1	-6149,98
5		101,325	-269,504	1694,09	13,655	1	-6149,98
11"		101,325	-257,354	1694,09	13,655	1	-5878,97
11'		101,325	-257,354	1694,09	13,655	1	-5878,97
6"		101,325	-200,184	1694,09	13,655	1	-4685,19
6'		101,325	-200,184	1694,09	13,655	1	-4685,19
1'		101,325	9,69039	1694,09	13,655	1	-318,739
Entrée Hélium		101,325	537,713	56,9068	0,458689	1	10663,9

V.4.2. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un étage de refroidissement préalable utilisant de l'azote liquide pour un branchement du détendeur à T=65K

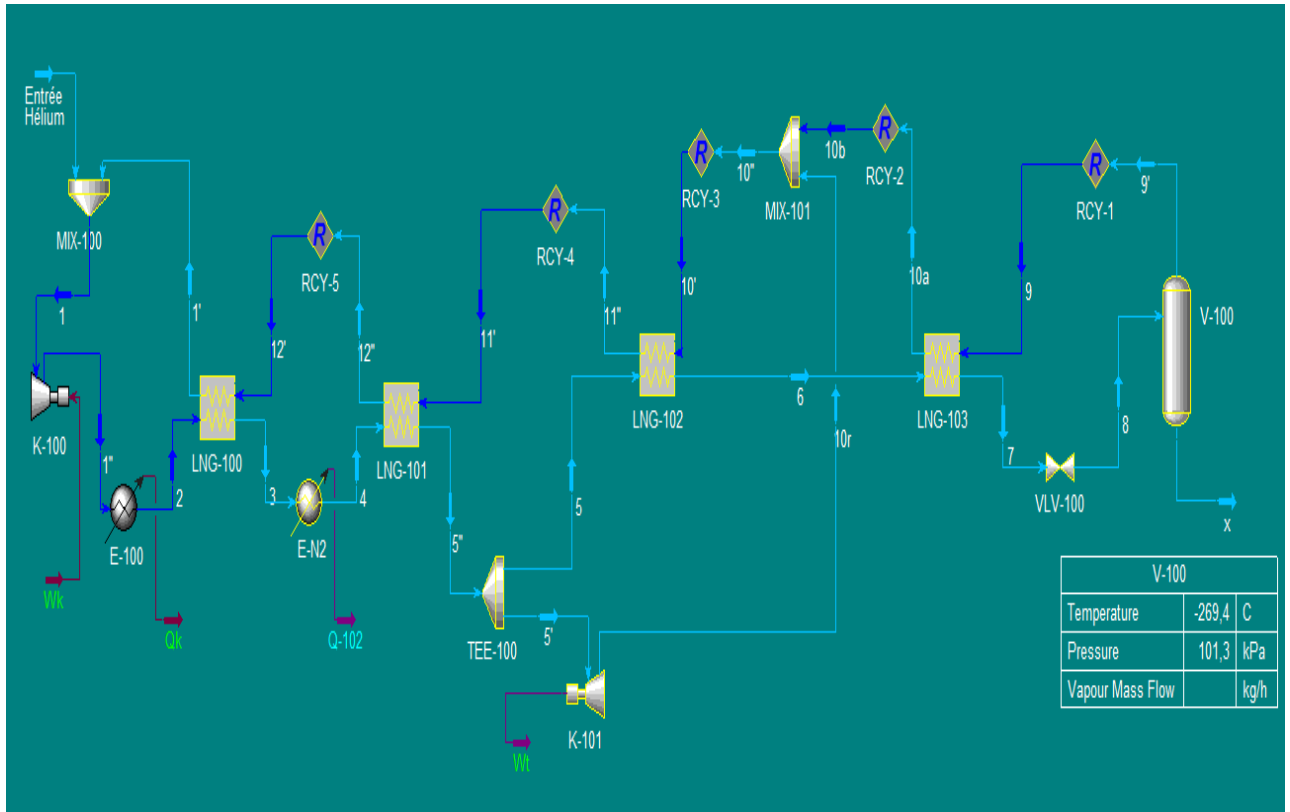


Figure. V. 12 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à T=65K et un taux de détente $\tau=25$

Le coefficient de liquéfaction x est :

$$x = 0\%$$

V.4.3. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote 80K et de l'azote sous vide 65K pour un branchement du détendeur à T=45K

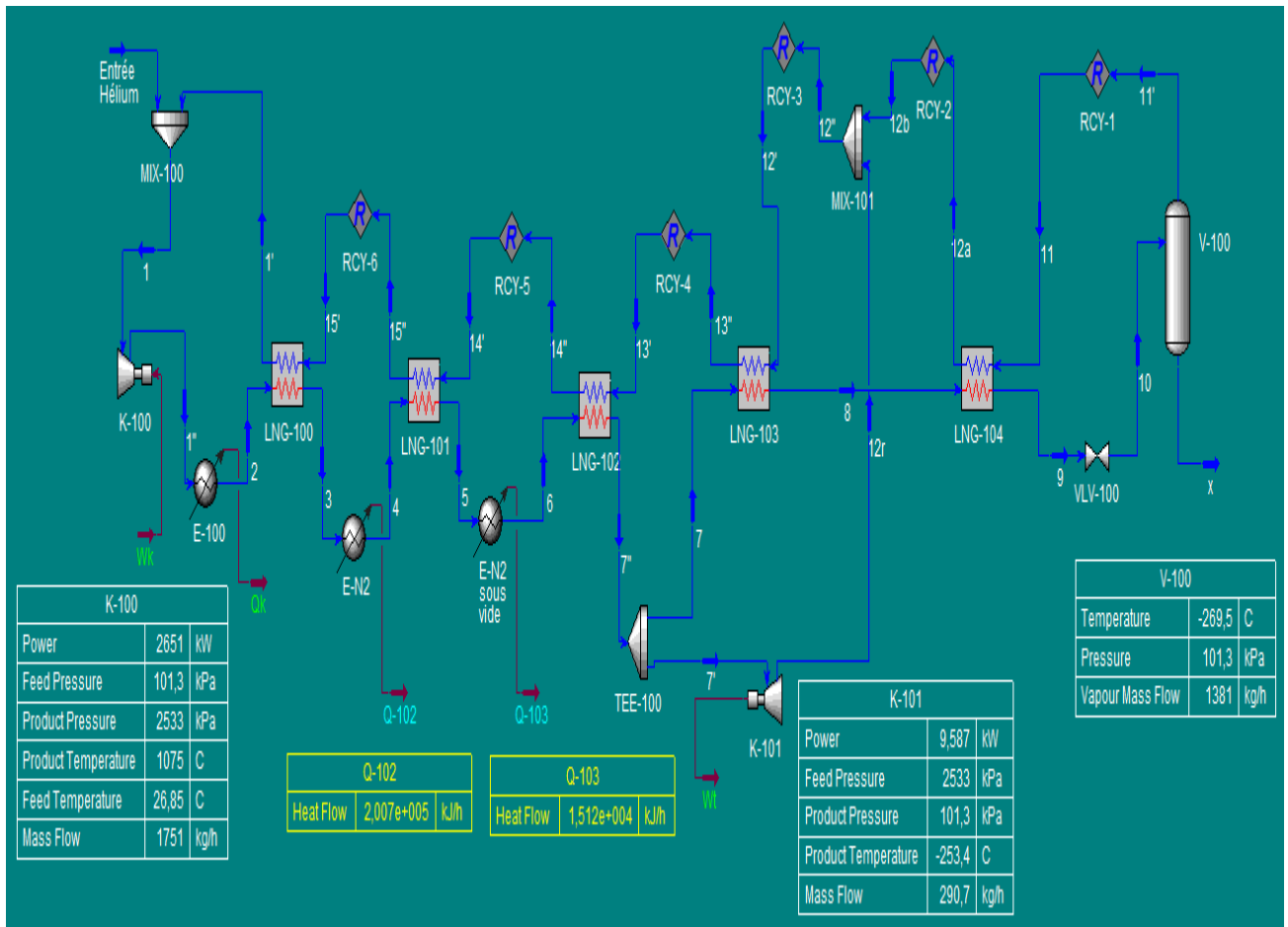


Figure. V. 13 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à T=45K et un taux de détente $\tau=25$

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - G - x)\dot{m}_c$$

$$x = (1 - G) - \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c}\right) = (1 - 0,166) - \left(\frac{1381}{1751}\right)$$

$$x = 0,0453 = 4,53\%$$

Tableau V.11 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à $T=45K$ et un taux de détente $\tau=25$

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		101,325	26,85	1751	14,1137	1	38,1913
1"		2533,12	1075,43	1751	14,1137	1	21853,4
2		2533	26,85	1751	14,1137	1	32,1448
3		2533	-171,425	1751	14,1137	1	-4111,82
4		2533	-193,15	1751	14,1137	1	-4570,56
5		2533	-206,53	1751	14,1137	1	-4854,95
6		2533	-208,15	1751	14,1137	1	-4889,53
7"		2533	-228,15	1751	14,1137	1	-5320,73
7		2533	-228,15	1460,33	11,7708	1	-5320,73
8		2533	-255,15	1460,33	11,7708	1	-5937,41
9		2533	-266,35	1460,33	11,7708	1	-6152,89
10		101,325	-269,504	1460,33	11,7708	0,945699	-6152,89
x		101,325	-269,504	79,2982	0,639172	0	-6203,86
7'		2533	-228,15	290,666	2,34287	1	-5320,73
12r		101,325	-253,418	290,666	2,34287	1	-5796,02
11'		101,325	-269,504	1381,04	11,1316	1	-6149,96
11		101,325	-269,504	1381,04	11,1316	1	-6149,96
12a		101,325	-259,391	1381,04	11,1316	1	-5922,11
12b		101,325	-259,391	1381,04	11,1316	1	-5922,11
12"		101,325	-258,357	1671,7	13,4745	1	-5900,19
12'		101,325	-258,357	1671,7	13,4745	1	-5900,19
13"		101,325	-232,643	1671,7	13,4745	1	-5361,48
13'		101,325	-232,643	1671,7	13,4745	1	-5361,48
14"		101,325	-210,971	1671,7	13,4745	1	-4909,82
14'		101,325	-210,971	1671,7	13,4745	1	-4909,82
15"		101,325	-196,666	1671,7	13,4745	1	-4611,94
15'		101,325	-196,666	1671,7	13,4745	1	-4611,94
1'		101,325	11,9658	1671,7	13,4745	1	-271,408
Entrée Hélium		101,325	340,64	79,2982	0,639172	1	6564,92

V.4.4. Cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote à 80K et de l'hydrogène pour un branchement du détendeur à T=20K

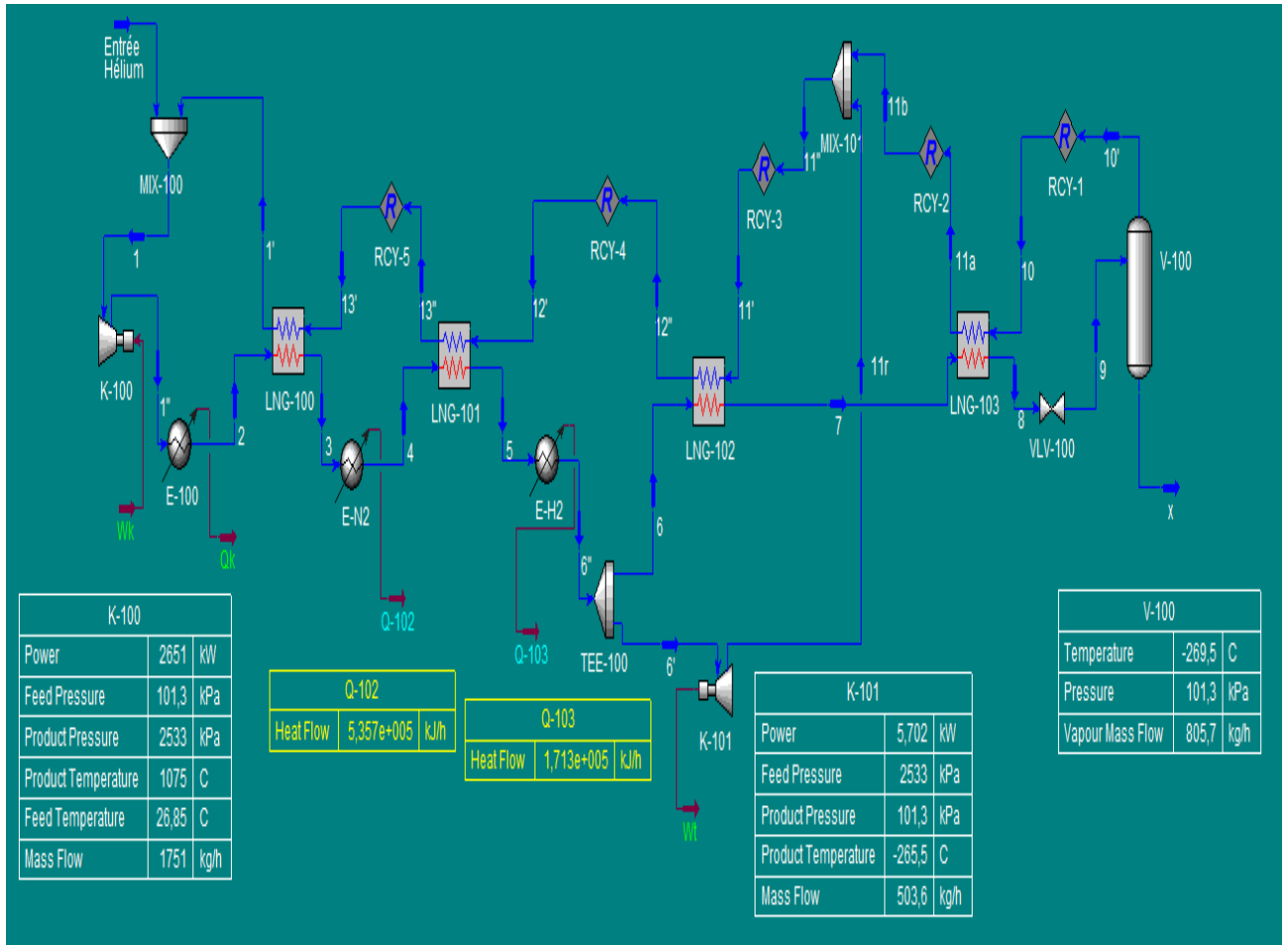


Figure. V. 14 : Installation du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à T=20K et un taux de détente $\tau=25$

Le coefficient de liquéfaction est :

$$\dot{m}_f = (1 - G - x)\dot{m}_c$$

$$x = (1 - G) - \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_c}\right) = (1 - 0,2876) - \left(\frac{805,7}{1751}\right)$$

$$x = 0,2522 = 25,22\%$$

Tableau V.12 : Points figuratifs du cycle combiné pour la liquéfaction de l'hélium avec un branchement du détendeur à T=20K et un taux de détente $\tau=25$

Name	Group	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
1		101,325	26,85	1751	14,1137	1	38,1913
1"		2533,12	1075,43	1751	14,1137	1	21853,4
2		2533	26,85	1751	14,1137	1	32,1448
3		2533	-134,95	1751	14,1137	1	-3345,92
4		2533	-193,15	1751	14,1137	1	-4570,56
5		2533	-236,19	1751	14,1137	1	-5497,92
6"		2533	-253,15	1751	14,1137	1	-5889,53
6		2533	-253,15	1247,41	10,0546	1	-5889,53
7		2533	-264,15	1247,41	10,0546	1	-6123,29
8		2533	-268,03	1247,41	10,0546	1	-6169,04
9		101,325	-269,504	1247,41	10,0546	0,645858	-6169,04
x		101,325	-269,504	441,76	3,56074	0	-6203,86
6'		2533	-253,15	503,59	4,05911	1	-5889,53
11r		101,325	-265,462	503,59	4,05911	1	-6052,71
10'		101,325	-269,504	805,65	6,49383	1	-6149,95
10		101,325	-269,504	805,65	6,49383	1	-6149,95
11a		101,325	-266,65	805,65	6,49383	1	-6079,11
11b		101,325	-266,65	805,65	6,49383	1	-6079,11
11"		101,325	-266,196	1309,24	10,5529	1	-6068,95
11'		101,325	-266,196	1309,24	10,5529	1	-6068,95
12"		101,325	-255,803	1309,24	10,5529	1	-5846,23
12'		101,325	-255,803	1309,24	10,5529	1	-5846,23
13"		101,325	-196,379	1309,24	10,5529	1	-4605,97
13'		101,325	-196,379	1309,24	10,5529	1	-4605,97
1'		101,325	20,779	1309,24	10,5529	1	-88,0878
Entrée Hélium		101,325	44,8425	441,76	3,56074	1	412,444

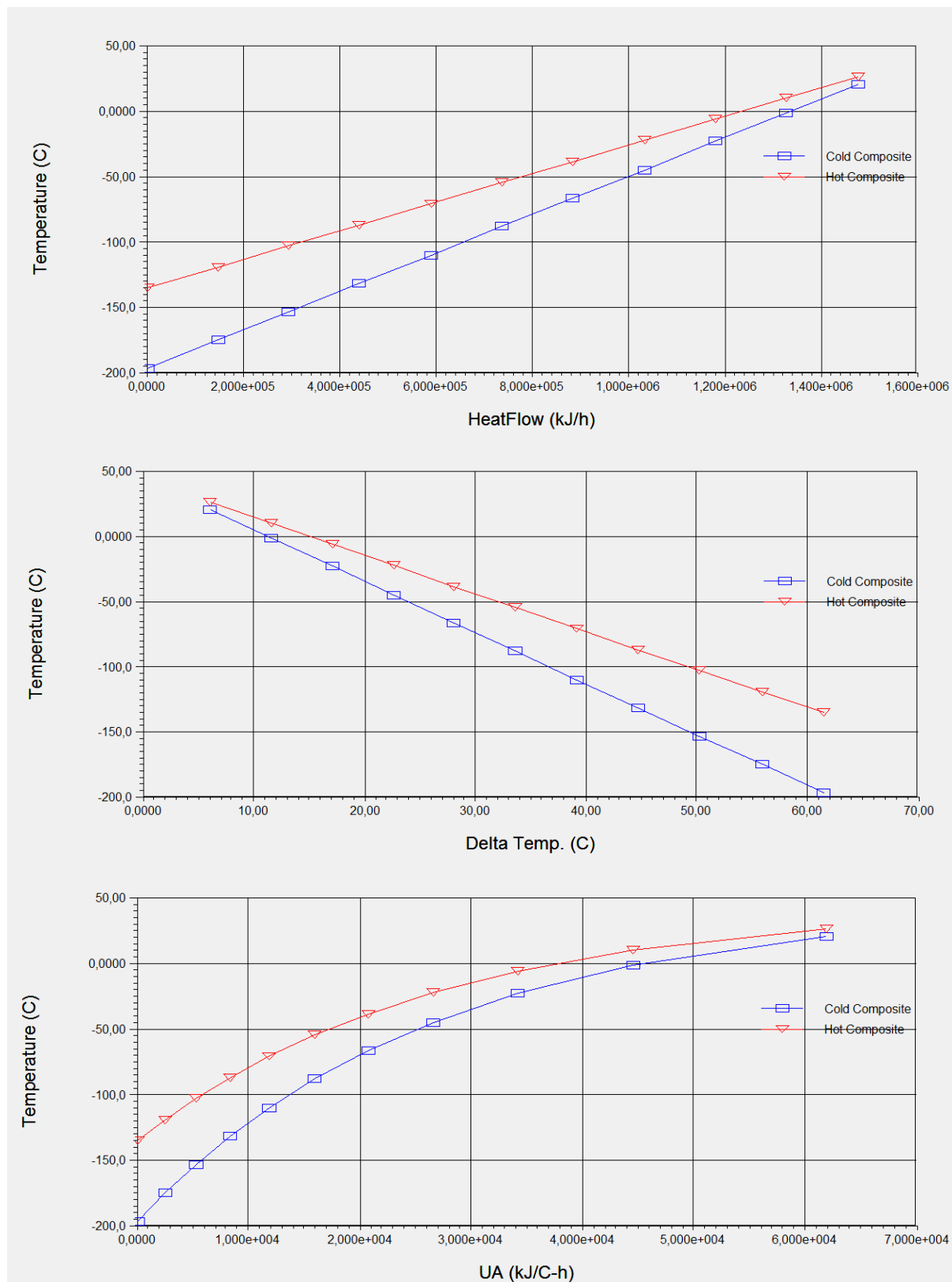


Figure. V. 15 : Allure des courbes de variation du flux de chaleur, de la différence de température et du coefficient d'échange global en fonction de la température au niveau de l'échangeur LNG-100 du cycle combiné avec branchement du détendeur à $T=20$ K pour la liquéfaction de l'hélium.

V.5. Interprétation des résultats de la simulation des différents cycles cryogéniques de liquéfaction des gaz utilisés : azote, hydrogène et hélium

Tableau V.13 : Liquéfaction de l'azote à $P_2=200$ bars

Cycle cryogénique	Coefficient X (%)
Cycle ES	6.86
ES+RP	13.83
Combiné (branchement à 300 K)	21.53
Combiné (branchement à 230 K)	26.22
Combiné (branchement à 160 K)	26.46

Les résultats obtenus montrent que :

- L'azote peut être liquéfié avec toutes les installations cryogéniques étudiées (cycles à ES, à ES+RP et les cycles combinés).
- Les cycles à étranglement simple peuvent être améliorés grâce à un refroidissement préalable ainsi que des cycles combinés.
- Le détendeur peut être branché à n'importe quel niveau de température pour la liquéfaction de l'azote (initial-intermédiaire-final).

Tableau V.14 : Liquéfaction de l'hydrogène à 160 et à 120 bars

Cycle cryogénique	Coefficient X (%)
Cycle ES	0
ES+RP ($P_2=160$ bars)	23.36
Combiné (détendeur à $T=80$ K) ($P_2=120$ atm)	32.86

Les résultats obtenus ont montré que :

- L'hydrogène ne peut être liquéfié avec des cycles cryogéniques à étranglement simple.

Cela dit :

- Il a été démontré que celui-ci pouvait être liquéfié avec des cycles à étranglement simple avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote (à $T=80$ K) et de l'azote sous vide (à $T=65$ K) ou alors avec des cycles combinés.
- Quant au détendeur, il ne peut être branché à n'importe quel niveau de température pour la liquéfaction de l'hydrogène.

Tableau V.15 : Comparaison des résultats calculés et simulés des cycles à étranglement simple avec deux (02) étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote liquide saturé à T=80K et l'hydrogène liquide à T=20K pour la liquéfaction de l'hélium

P ₂ (atm)		15	20	25
X(%)	Calculé	0.93	2.52	3.65
	Simulé	1.14	2.93	3.25
	Δx	0,21	0,41	0,4
Q ₀ (kJ/kg)	Calculée	93.53	121.27	139.0
	Simulée	94.48	122.0	135.5
	ΔQ_0	0,95	0,73	3,5

Tableau V.16 : Comparaison des résultats calculés et simulés des cycles combinés pour la liquéfaction de l'hélium avec deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote liquide saturé à T=80K et l'hydrogène liquide pour un branchement du détendeur à T=20K

Paramètres	Résultats des Calculs	Résultats de la Simulation	Ecart
X (%)	22,65	25,226	$\Delta x = 2,576$
q ₀ (kJ/kg)	401,683	404,09236	$\Delta Q_0 = 2,409$

Interprétation des résultats de la simulation :

- On voit que les résultats de la simulation sont presque similaires à ceux calculés : Cette légère différence est due au fait que le logiciel ne dispose que de l'isotope Hélium3 (ayant une température de liquéfaction égale à T=3,2K).
- L'hélium ne peut être liquéfié avec des cycles cryogéniques à étranglement simple, il peut être liquéfié avec des cycles à étranglement simple à deux étages de refroidissement préalable utilisant de l'azote liquide à T=80 K et l'hydrogène liquide à T=20 K ou bien à l'aide des cycles combinés.
- Le détendeur quant à lui doit être branché à un niveau de température inférieur à 65 K pour avoir un taux de détente $\tau=25$ permettant l'obtention de bons rendements.

CONCLUSION GENERALE

Ce projet de fin d'étude nous a permis d'étudier de près la liquéfaction des gaz ainsi que le fonctionnement des différents cycles cryogéniques tout en se familiarisant avec les gaz les plus connus et les plus utilisés dans le domaine de la cryogénie.

Au niveau de la centrale à oxygène, il a été possible d'observer le déroulement de la liquéfaction par le procédé de la séparation des gaz de l'air (l'azote, l'oxygène et l'argon) où nous avons pu voir de près le fonctionnement de ce cycle industriel (Processus détaillés précédemment dans le chapitre I).

Le but majeur de cette étude fut le calcul thermodynamique et la simulation des cycles cryogéniques de la liquéfaction de l'hélium à 4.2 K.

Il a été démontré tout au long de ce travail que :

- Le refroidissement préalable utilisant l'azote liquide et l'hydrogène liquide est indispensable pour la liquéfaction de l'hélium car atteindre une très basse température 4.2 K nécessite l'intervention d'agents cryogéniques externes fonctionnant suivant des cycles extérieurs opérant eux-mêmes des températures très basses tels que l'azote liquide à 80 K et l'hydrogène liquide à 20 K.
- La pression finale de l'hélium dans le cycle à étranglement simple avec refroidissement préalable utilisant de l'azote liquide saturé à 80 K et de l'hydrogène liquide à 20 K, donnant de bons résultats est $P_2=25\text{atm}$ avec un rendement thermodynamique de l'installation cryogénique de $\eta = 7,7\%$ contre à un rendement de $\eta = 5,74\%$ et $\eta = 2,35\%$ pour des pressions de 20atm et 15atm respectivement.
- Le coefficient de liquéfaction s'améliore considérablement lorsqu'on passe du cycle ES+RP au cycle combiné, il passe de 3.65% à 22.65%.
- La quantité de chaleur extraite par RP dans le cas du cycle ES+RP est de consommation d'énergie 139 kJ/kg, elle est plus importante pour le cycle combiné et vaut 401.68 kJ/kg.
- La consommation d'énergie spécifique diminue pour l'ensemble des cycles examinés lorsque le taux de compression augmente. Elle est de 89 MJ/kg pour le cycle ES+RP à 25atm et vaut 15.6 MJ/kg pour le cycle combiné. Ce qui constitue un gain énergétique et économique très important
- Le cycle approprié pour la liquéfaction de l'hélium est le cycle combiné avec un branchement du détendeur à un niveau de température strictement inférieur à 65K, température de référence pour le refroidissement préalable par l'azote sous vide atmosphérique, car d'une part :
 - Le cycle combiné avec branchement du détendeur à $T=45\text{ K}$ (température d'inversion supérieur de l'hélium), utilisant un refroidissement préalable avec de l'azote liquide

Conclusion générale

avait donné un $\eta = 4,53\%$ (dans ce cas, le détendeur a remplacé le refroidissement préalable fonctionnant à l'hydrogène liquide).

D'autre-part :

- Le cycle combiné avec branchement du détendeur à $T=20\text{ K}$ (utilisant un refroidissement préalable avec de l'azote et de l'hydrogène liquide) avait quant à lui donné un très bon rendement thermodynamique $\eta = 43,98\%$ (x6 plus grand).
- Les principaux équipements : compresseur et échangeur de chaleur ont été dimensionnés pour assurer les performances désirées de l'installation cryogénique.
- Au cours de cette étude, la simulation des cycles cryogéniques par le logiciel HYSYS V.7 fut un excellent moyen permettant de confirmer la fiabilité et la précision dans la détermination de l'ensemble des caractéristiques thermodynamiques calculées pour les diverses installations cryogéniques examinées.

REFERENCES

[1] PETER WILLIAM ATKINS Elements of Physical Chemistry, Second Edition, Oxford University Press 1996.

[2] <http://lepuitedsciences-com.over-blog.com/2015/04/les-etats-de-la-matiere.html>

[3] WILLIAM RAMSAY, Les gaz de l'atmosphère: histoire de leur découverte

[4] https://www.lindegas.fr/fr/products_and_supply/gases_atmospheric/index.html

[5] HUBERT REEVES et JANINE THIBAUT « L'air au quotidien » approche théorique et expérimentale, Association Graine de chimiste P58

[6] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-air-4452/>

[7] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Liqu%C3%A9faction>

[8] Techniques de l'ingénieur, opération unitaire traitement des gaz P18

[9] Manuel opératoire de « AIR LIQUIDE », la séparation des gaz de l'air, centre de perfectionnement TRAINING CENTER

[10] LENNTECH, chemical properties of nitrogen-Health effects of nitrogen-Environmental effects of nitrogen, Site Web: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/n.htm>

[11] LENNTECH, chemical properties of argon-Health effects of argon-Environmental effects of argon, Site Web: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/ar.htm>

[12] LENNTECH, chemical properties of oxygen-Health effects of oxygen-Environmental effects of oxygen, Site Web: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/o.htm>

[13] LENNTECH, chemical properties of hydrogen-Health effects of hydrogen-Environmental effects of hydrogen, Sites Web:

<https://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm> <https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrogène>

[14] A. MIRAOUI et B. BLUNIER, 20 questions sur la pile à combustible- l'hydrogène vecteur énergétique de demain, © Edition technip, Paris, 2009

[15] Techniques de l'ingénieur, Cryogénie, mise en œuvre, Propriétés physiques usuelles des fluides cryogéniques B 2 381

[16] LENNTECH, chemical properties of helium-Health effects of helium-Environmental effects of helium, Site Web: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/he.htm>

[17] B. LECKERCQ et B. DIU, La physique mot à mot Hélium

Références

- [18] L'Hélium et ses caractéristiques, la découverte de l'Hélium, Site Web : <http://lhelium.e-monsite.com/pages/page/sommaire.html>
- [19] S.W.VAN SCIVER, Helium Cryogenics, International Cryogenics Monograph series, © Springer Science Business Media, 2012
- [20] Techniques de l'ingénieur Froid cryogénie et applications industrielles BE9817 P44 -P46
- [21] https://fr.wikipedia.org/wiki/Air_liquide
- [22] https://fr.wikipedia.org/wiki/Linde_AG
- [23] <https://www.info-chimie.fr/air-products-et-sonatrach-voient-encore-plus-grand-en-algerie,95219>
- [24] <http://www.aps.dz/economie/79930-gaz-industriels-sonatrach->
- [25] http://freveille.free.fr/Eau_liquide_vapeur.html
- [26] La thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques, Site Web: <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/cycles-combines.html>
- [27] Techniques de l'ingénieur, Froid cryogénie et applications industrielles « Liquéfaction de l'hélium et réfrigération à l'hélium de moyennes et fortes puissances » P35
- [28] G. VENKATARATHNAM, Cryogenic Mixed Refrigerant Processes, The International Cryogenics General Editors 2008. 249 Pages
- [29] MILIND. D. ATREY, Manuel Cryogenic Engineering Department of Mechanical Engineering
- [30] Manuel d'instruction pour compresseur d'oxygène à piston sec type 4D375-3A
Installation: Société Nationale de Sidérurgie d'El-Hadjar, Algérie
- [31] <http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/composants/le-compresseur.html>
- [32] M. JULIEN, Hydraulique industrielle, Théorie et exercices © 2017 les Editions JFD P.374
- [33] <https://energie.wallonie.be/fr/differents-types-d-echangeurs-de-chaleurs.html?IDC=8049&IDD=97759>
- [34] R. LELEU, Transferts de chaleur, Paris, Éditions techniques de l'ingénieur, 1992.
- [35] Techniques de l'ingénieur, Echangeurs de chaleur-Dimensionnement thermique BE9517 V1, 2014

Consultation des mémoires :

Références

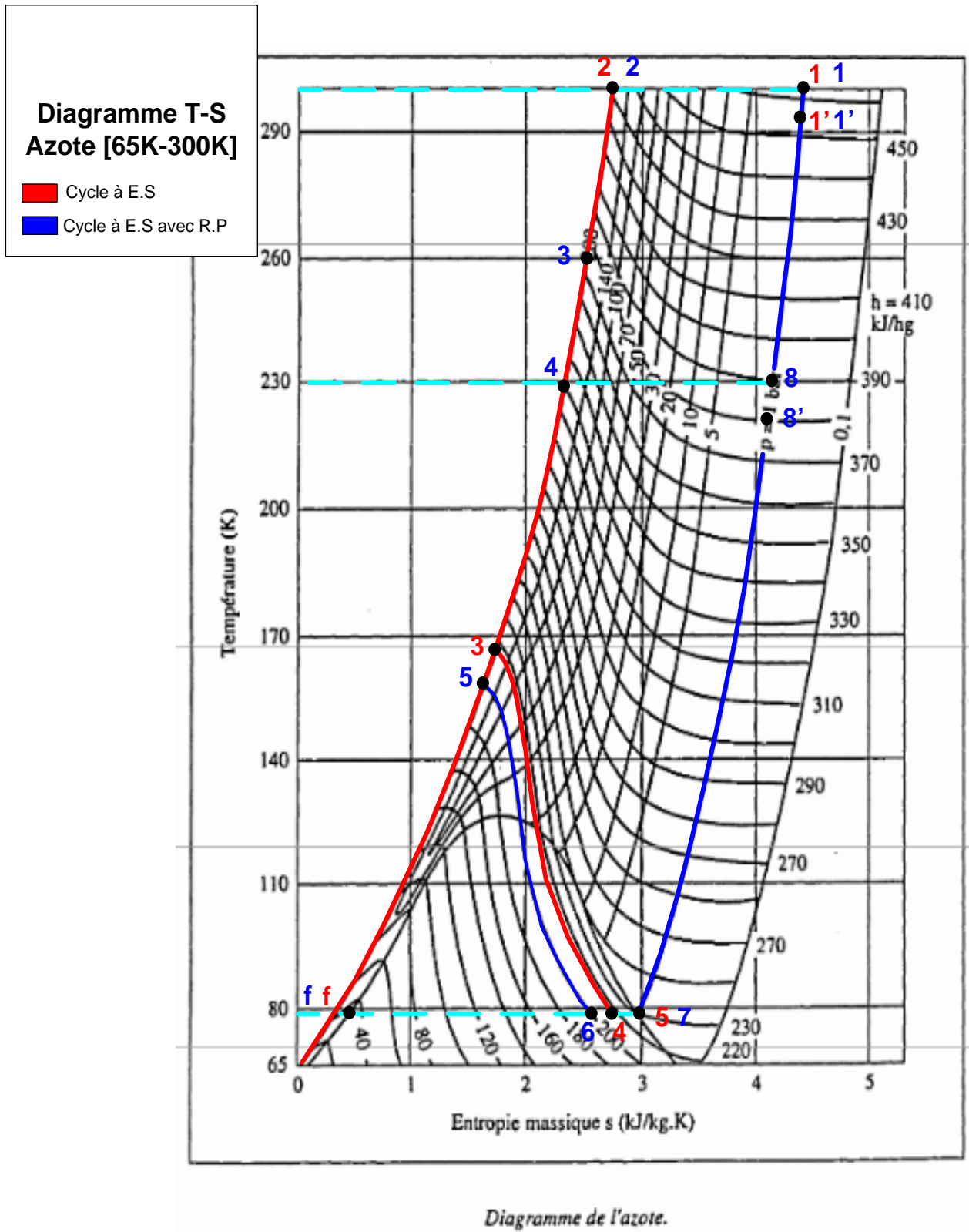
Etude et optimisation de la maintenance de la COX du complexe Sider EL-Hadjar, TAHAR Ahlam, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.

Calcul thermique d'une installation cryogénique de liquéfaction de l'hydrogène, CHAIB RASSOU Sabrina, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.

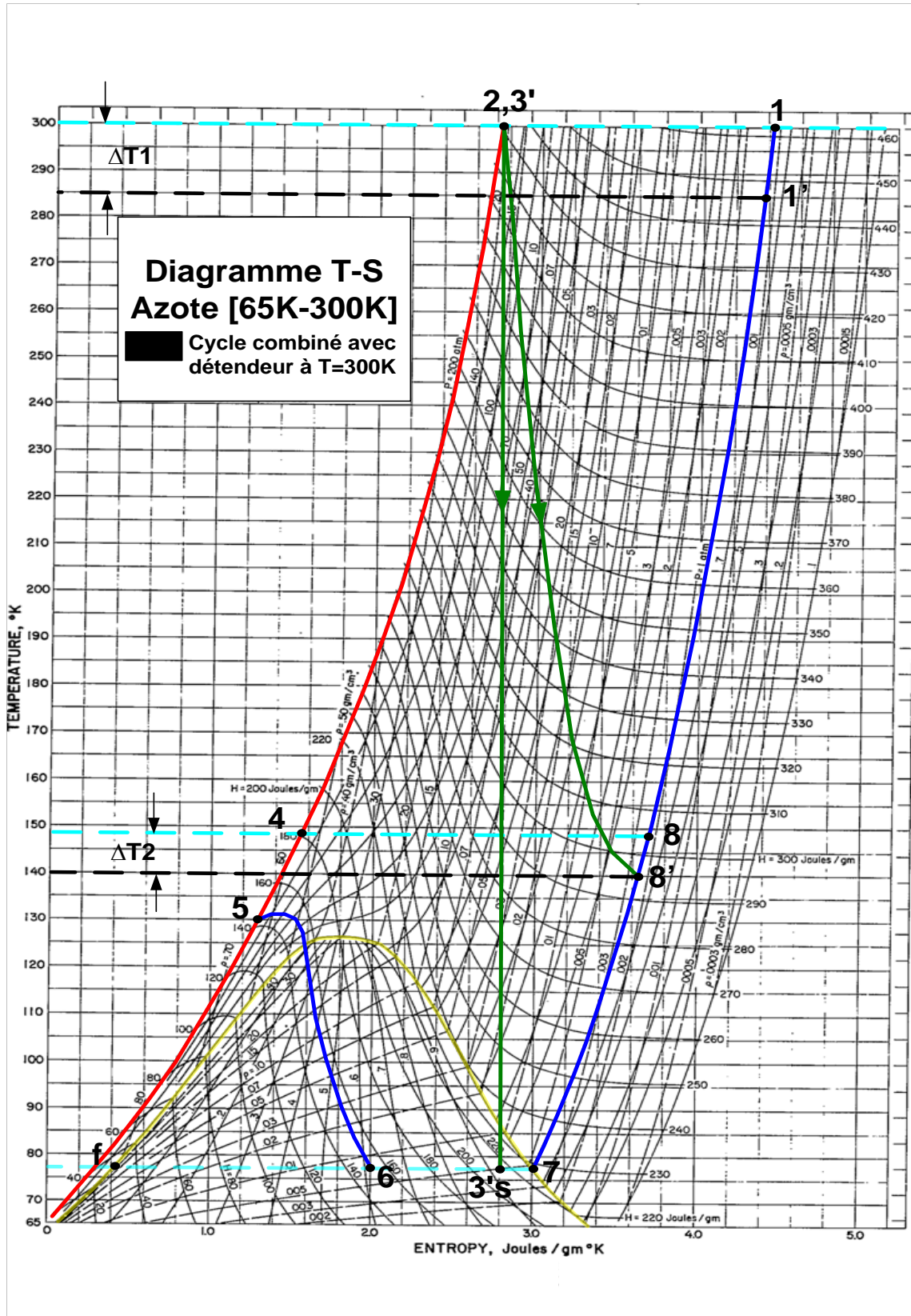
Etude thermodynamique et simulation du cycle de liquéfaction d'azote, AMIRAT Mohamed Cherif, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.

ANNEXES

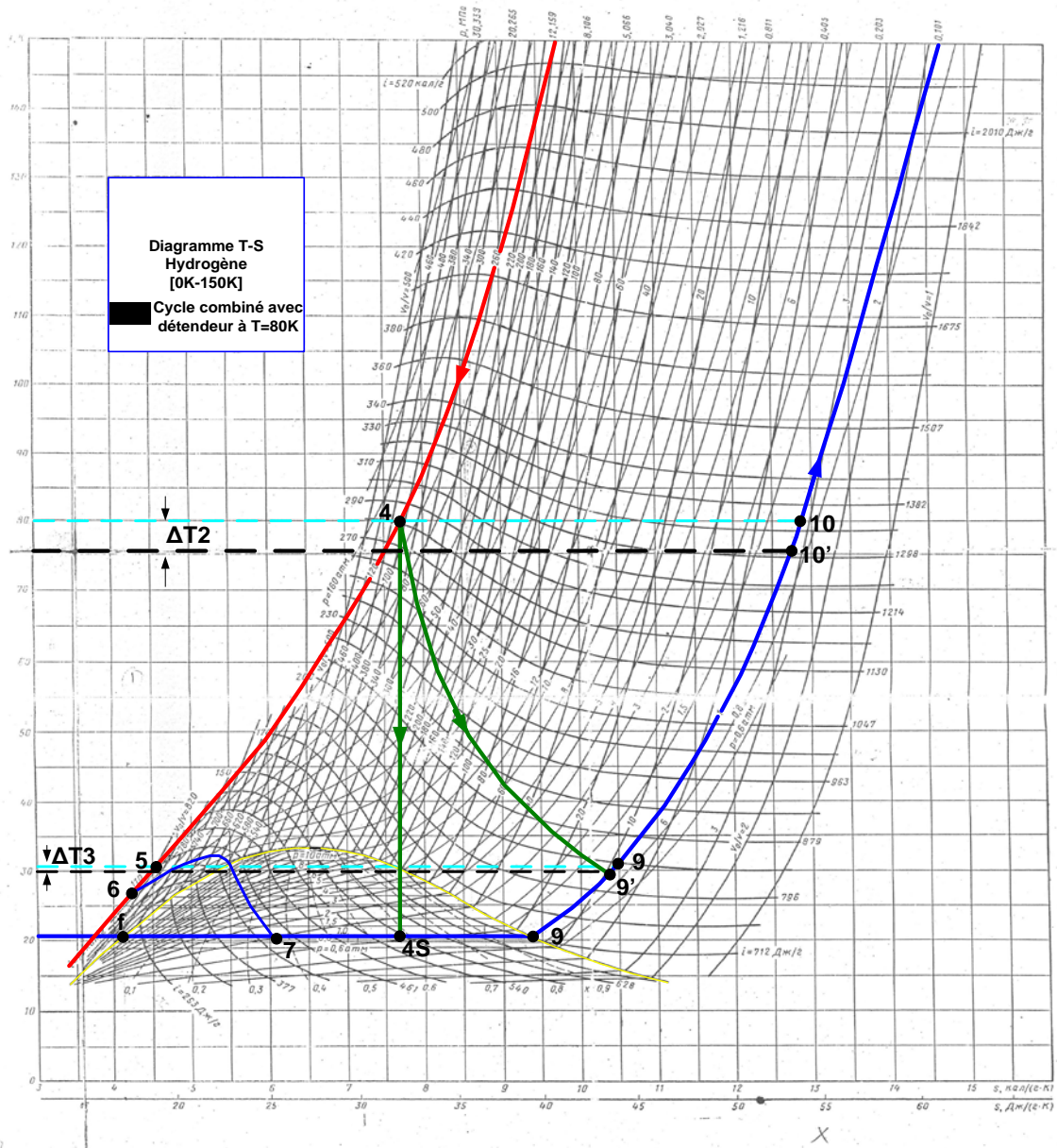
Annexe I : Représentation des cycles de liquéfaction de l'Azote à E.S et à (E.S+R.P)



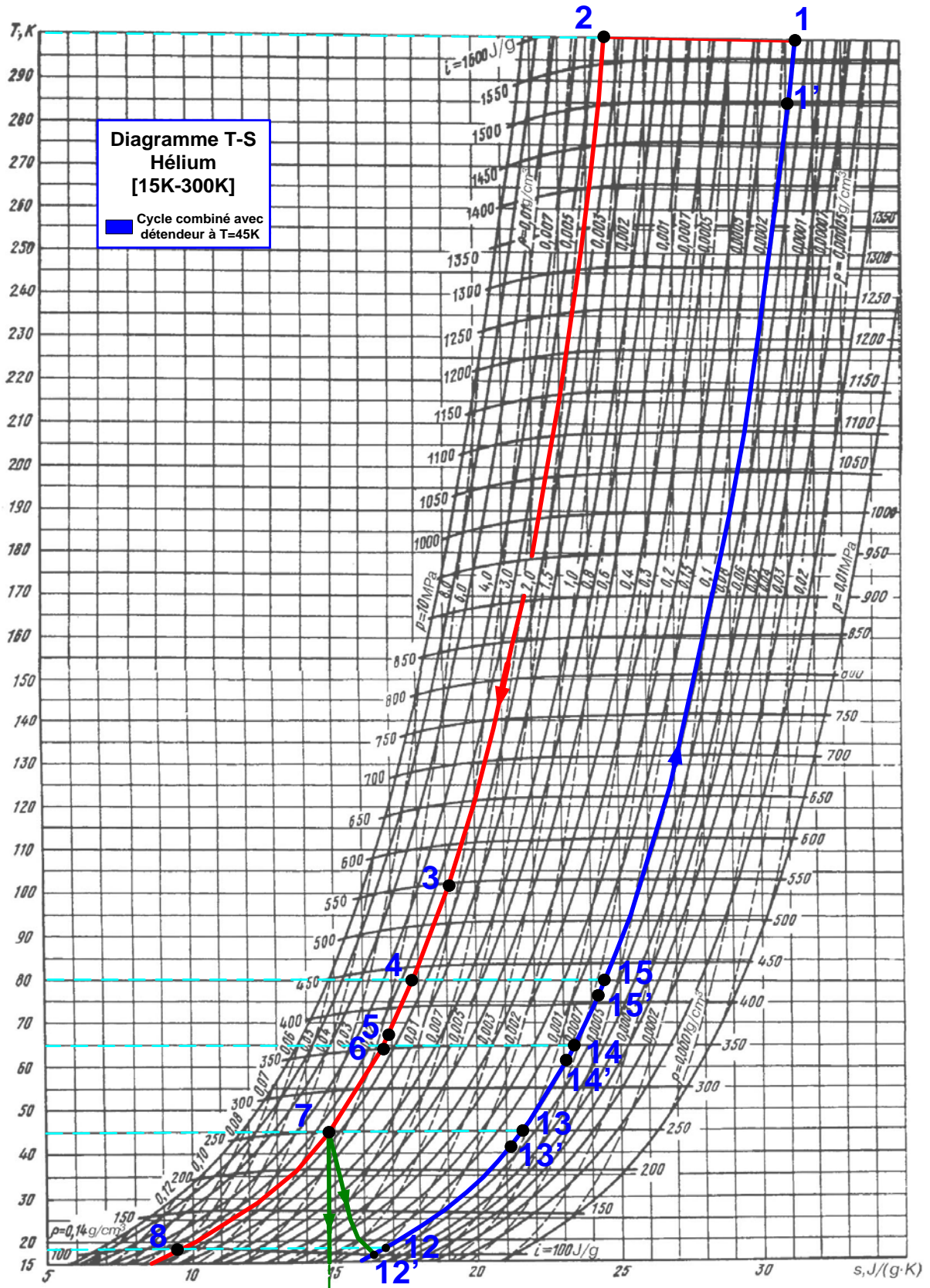
**Annexe II : Représentation du cycle combiné de liquéfaction de l'Azote avec
branchement du détendeur au niveau initial de température**

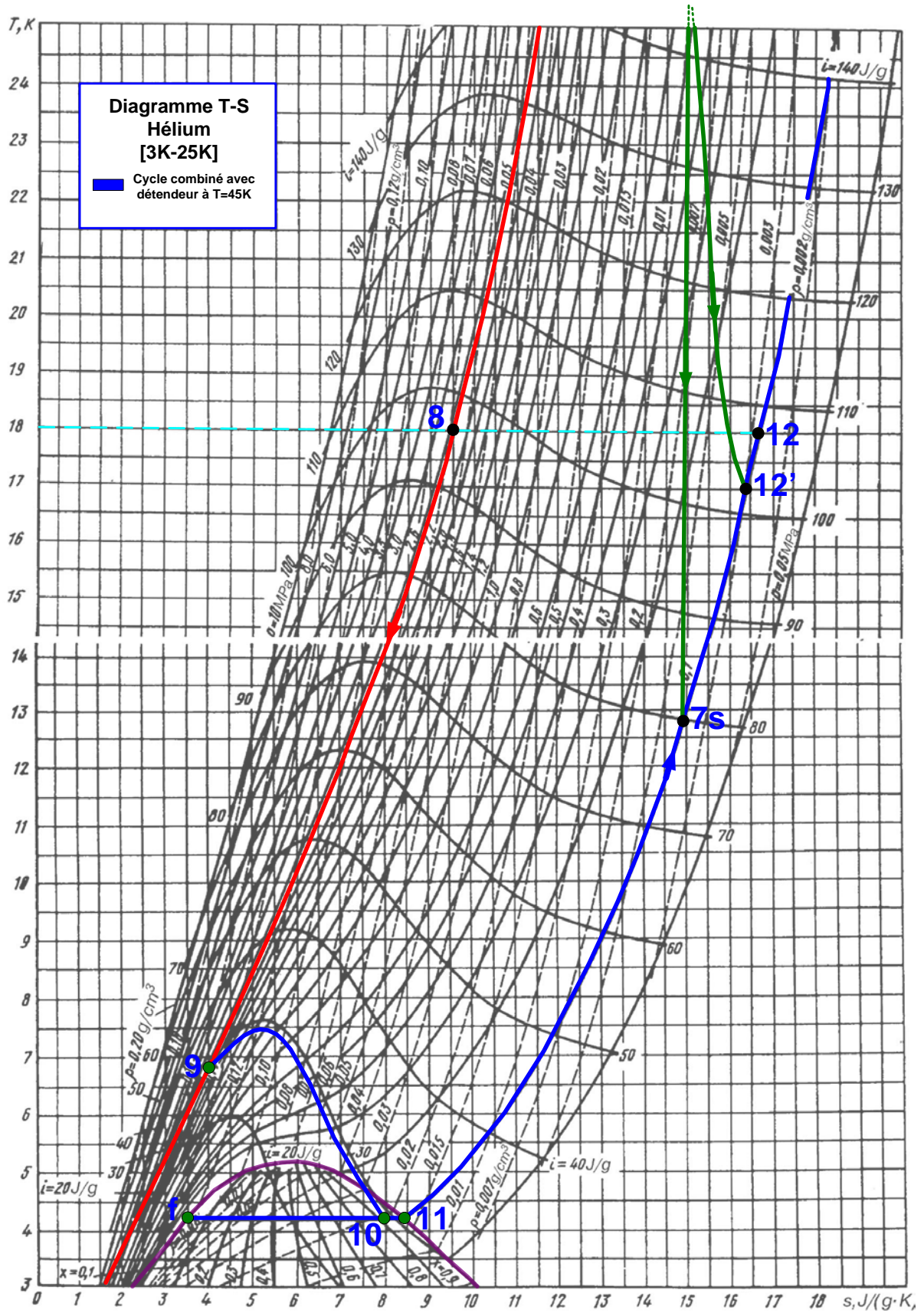


Annexe III: Représentation du cycle combiné de liquéfaction de l'Hydrogène avec branchement du détendeur à T=80K



**Annexe IV : Représentation du cycle combiné de liquéfaction de l'Hélium avec
branchement du détendeur à T=45K**





Annexe V : Représentation des cycles de liquéfaction de l'Hélium les plus rentables
 (Cycle combiné avec branchement du détendeur à T=20K et le cycle à ES+RP)

