

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement  
/...../...../.....



كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم هندسة الطرائق

Département de : Génie des Procédés

**Mémoire**

Pour l'obtention du diplôme de master

Domaine: Sciences et de la Technologie

Filière: Génie des Procédés

Spécialité: Génie chimique

**SIMULATION D'UNE UNITE DE PRODUCTION  
D'OXYGENE LIQUIDE SUR HYSYS UNITÉ " CALGAZ  
DE LAGHOAT "**

Soutenue publiquement le...../...../.....

Par

Drine omar

Herma safa

Devant le jury composé de:

|                        |     |                     |              |
|------------------------|-----|---------------------|--------------|
| BENCHEIKH Salah eddine | MAB | Université Ghardaïa | Examineur    |
| BENSEDDIK Abdelouahab  | MAB | Université Ghardaïa | Examineur    |
| ZITANI Brahim          | MAA | Université Ghardaïa | Encadreur    |
| TRABELSI Amel          | MAA | Université Ghardaïa | Co-Encadreur |

Année universitaire 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## DEDICASE

*Je souhaite dédier ce travail à mes parents, mes parents aimants et protecteurs que vous ne pourrez jamais avoir ; Ils sont mon inspiration et ma persévérance. Il n'y a pas assez de mots au monde pour décrire à quel point je vous suis reconnaissant à tous les deux, vous m'avez tous les deux aidé à faire de moi l'homme que je suis aujourd'hui.*

*Un cadeau à mon honorable épouse, qui m'a soutenu dans mon voyage d'études*

*Pour mes chers frères, quelle chance j'ai d'être entouré de vous, vous avez toujours été mon plus fervent supporter. Et merci à tous les membres de ma famille, j'ai tellement de chance de vous avoir à mes côtés, et à tous mes amis fidèles, en particulier à mes meilleurs amis Elias et Hassan.*



**DEDICASE**

*Je dédie ce travail*

*A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

*Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*A moi-même grâce à qui je suis ici aujourd'hui*

*A ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion*

*Lors de la réalisation de ce travail.*

## ***Remerciement***

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr : (ZITANI Brahim), son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.*

*Nous remercions tous les professeurs qui nous ont soutenus dans notre cheminement universitaire et ont fait de leur mieux pour nous éduquer et nous guider.*

*Et sans oublier de remercier la famille et les proches qui nous ont soutenus en tout temps.*

*Il a remercié les amis d'étude avec qui nous avons passé de bons ou mauvais moments, en particulier les étudiants du département de génie chimique.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés et soutenus et nous ont aidés à terminer ce le projet a réussi.*

## *LISTE DES TABLEAUX*

|  |    |
|--|----|
| Tableau I.1: Exemple de planification du débit d'oxygène par établissement de 100 Lits. ....   | 6  |
| Tableau I.2 : Description et comparaison des sources d'oxygène et du stockage.....             | 7  |
| Tableau I.3 : Température d'ébullition des gaz l'air.....                                      | 9  |
| Tableau II. 1 : Table de propriété des Cryo- fluides.....                                      | 32 |
| Tableau III. 1 : Propriétés physiques et chimiques de l'oxygène liquide.....                   | 38 |
| Tableau V. 1: Résultat de simulation pour le cycle de liquéfaction et séparation de l'air..... | 94 |
| Tableau V. 2 : La consommation un énergie électriques .....                                    | 95 |
| Tableau V. 3 : Production de l'unité. ....   | 95 |
| Tableau V. 4 :Résultat de simulation pour le cycle de liquéfaction et séparation de l'air..... | 98 |
| Tableau V. 4 : La consommations un énergie électriques.....                                    | 99 |
| Tableau V.4 : Production de l'unité.....   | 99 |

## *LISTE DES FIGURES*

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1: Calgaz-Algérie exporte de l'oxygène médicale.....                                     | 4  |
| Figure I.2: L'oxygénation pulmonaire au temps de la COVID19.....                                  | 5  |
| Figure I.3: composants de l'air.....  | 8  |
| Figure I.4: Unité de filtres à poucière.....  | 10 |
| Figure I.5: Unité d'élimination des impuretés.....  | 11 |
| Figure I.6: Unité de l'échangeur.....   | 11 |
| Figure I.7: Le compresseur recyclage a 26 bar.....  | 12 |
| Figure I.8: Turboexpander.....  | 13 |
| Figure I.9: Détente de Joule Thomson d'un gaz parfait.....  | 15 |
| Figure I.10: La colonne distillation de l' air ( $O_2$ et $N_2$ ).....                            | 16 |
| Figure I.11: Stockage de oxygène.....   | 16 |
| Figure I.12: l'unité de production d'oxygène CALGAZ.....  | 17 |
| Figure II.1: Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs.....                | 19 |
| Figure II.2 : Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz.....   | 24 |
| Figure II.3 : cycle de liquéfaction de Linde.....   | 25 |
| Figure II.4 : Cycle de liquéfaction de Linde avec pré-refroidissement.....                        | 26 |
| Figure II.5 : Cycle de Linde à détente étagée.....  | 26 |
| Figure II.6 : cycle de liquéfaction de Claude.....  | 27 |
| Figure II.7 : cycle de liquéfaction de Kapitza.....   | 28 |
| Figure II.8 : Cycle de liquéfaction de Collins (1952).....  | 28 |
| Figure II.9 : cycle en cascade classique.....   | 29 |
| Figure II.10 : Composition de l'air.....  | 31 |
| Figure II.11 : Point d'ébullition des composants de l'air.....                                    | 32 |
| Figure III.1 : Schéma de séparation de l'air.....   | 44 |
| Figure III.2 : fonctionnement du processus principal d'une séparation cryogénique de l'air.....   | 45 |
| Figure III.3 : Séparation des gaz de l'air.....   | 48 |
| Figure III.4.a : Une colonne de distillation Normale.....   | 50 |
| Figure III.4.b : Double colonne de Linde.....   | 50 |
| Figure III.5 : Un compresseur à vis lubrifié le schéma du modèle avec les conditions limites..... | 52 |
| Figure III.6 : Schéma d'un échangeur plaques et ailettes en aluminium.....                        | 52 |
| Figure III.7 : Les différents types de régénérateurs.....   | 53 |
| Figure III.8 : Une turbine à gaz cryogénique.....   | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Figure IV.1: Déclaration initiale des composants et des emballages de fluides.....                              | 59 |
| Figure IV.2: écran HYSYS avec différents types d'équipements de traitement dans un processus de raffinerie..... | 60 |
| Figure IV.3: Mise en contact de la pompe avec les flux.....   | 61 |
| Figure IV.4: Contacter Compressor avec Streams.....   | 62 |
| Figure IV.5: Connexions des flux pour l'échangeur de chaleur.....   | 63 |
| Figure IV.6: Connexions d'un environnement de colonne de distillation convergente.....                          | 63 |
| Figure IV.7: Simulation d'un navire.....  | 64 |
| Figure IV.8: Absorption rebouillie.....   | 64 |
| Figure IV.9: Écran séparateur triphasé.....   | 65 |
| Figure V.1 La composition du gaz de l'air.....  | 68 |
| Figure V.2 : Paramètre d'entrée.....  | 69 |
| Figure V.3 : compresseur axial.....   | 69 |
| Figure V.4 : Paramètre d'entrée-sortie du compresseur.....  | 70 |
| Figure V.5 : Le refroidisseur.....  | 70 |
| Figure V.6 : Paramètre d'entrée-sortie du refroidisseur.....  | 71 |
| Figure V.7 : l'échangeur.....   | 71 |
| Figure V.8 : Paramètre d'entrée-sortie de l'échangeur.....  | 72 |
| Figure V.9 : Le mixeur (mix-100).....   | 72 |
| Figure V.10 : Paramètre d'entrée-sortie du mixeur.....  | 73 |
| Figure V.11 : Le compresseur (k-101).....   | 74 |
| Figure V.12 : Paramètre d'entrée-sortie de compresseur.....   | 74 |
| Figure V13 : Le refroidissement.....  | 75 |
| Figure V 14 : Paramètre d'entrée-sortie du refroidisseur.....   | 75 |
| Figure V 15 : Le séparateur.....  | 76 |
| Figure V 16 : Paramètre d'entrée-sortie séparateur.....   | 76 |
| Figure V 17: Le compresseur de recyclage d'air.....   | 77 |
| Figure V 18: Paramètre d'entrée-sortie du compresseur.....  | 77 |
| Figure V 19: le refroidissement.....  | 78 |
| Figure V 20: Paramètre d'entrée-sortie du refroidissement.....  | 78 |
| Figure V 21: Le compresseur.....  | 79 |
| Figure V 22 : Paramètre d'entrée-sortie du compresseur.....   | 79 |
| Figure V 23: le refroidissement.....  | 80 |
| Figure V24 : Paramètre d'entrée-sortie du refroidissement.....  | 80 |
| Figure V 25: L'échangeur.....   | 81 |

|   |    |
|---|----|
| Figure V 26: Paramètre d'entrée-sortie du l'échangeur. ....                 | 81 |
| Figure V 27: le compresseur. ....   | 82 |
| Figure V 28: Paramètre d'entrée-sortie du compresseur. ....                 | 82 |
| Figure V 29: l'échangeur. ....  | 83 |
| Figure V 30: Paramètre d'entrée-sortie du l'échangeur. ....                 | 83 |
| Figure V 31: le compresseur. ....   | 84 |
| Figure V 32: Paramètre d'entrée-sortie du compresseur. ....                 | 84 |
| Figure V 33: l'échangeur. ....  | 85 |
| Figure V 34: Paramètre d'entrée-sortie du l'échangeur. ....                 | 85 |
| Figure V 35: Le recycleur. ....   | 86 |
| Figure V 36: Paramètre d'entrée-sortie du recycleur. ....                   | 86 |
| Figure V 37 : la colonne distillation.....                                  | 87 |
| Figure V 38: Paramètre d'entrée-sortie de la colonne distillation. ....     | 87 |
| Figure V 39 : le séparateur. ....   | 88 |
| Figure V 40 : Paramètre d'entrée-sortie du séparateur. ....                 | 88 |
| Figure V 41: la vanne de joule Thomson.....                                 | 89 |
| Figure V 42 : Paramètre d'entrée-sortie du vanne. ....                      | 89 |
| Figure V 43:la vanne joule Thomson.....                                     | 90 |
| Figure V 44: Paramètre d'entrée-sortie du vanne. ....                       | 90 |
| Figure V. 45 : la vanne joule Thomson.....                                  | 91 |
| Figure V 46 Paramètre d'entrée-sortie du vanne. ....                        | 91 |
| Figure V 47: colonne de distillation T-102.....                             | 92 |
| Figure V 48: Paramètre d'entrée-sortie de la colonne distillation. ....     | 92 |
| Figure V.49: Schéma globale de production d'oxygène. ....                   | 93 |
| Figure V.50: Schéma globale de la Proposition de production d'oxygène. .... | 97 |

## NOMENCLATURE

| <b>GLOSSAIRE LETTERS LATINE NON INDICES</b> |  |                     |
|---|--|---------------------|
| <b>Symbole</b>                              | <b>Désignation</b>                                   | <b>Unité</b>        |
| P   | pression   | Bar                 |
| V   | Volume   | m <sup>3</sup>      |
| W   | Travail  | KJ/Kg               |
| U   | Energie interne                                      | KJ                  |
| H   | Enthalpie  | KJ/Kg               |
| T   | Température  | K                   |
| C <sub>p</sub>                              | La chaleur spécifique du gaz<br>à pression constante | $\frac{KJ}{Kg - K}$ |
| $\dot{m}$                                   | Débit massique                                       | Kg/s                |
| B   | Colonne de distillation                              | -                   |
| P   | Pompe  | -                   |
| C   | Compresseur  | -                   |
| E   | Echangeur  | -                   |
| M   | Masse molaire  | Kg/mol              |
| D   | La densité   | Kg/m                |
| R   | Constants universelle des gaz<br>parfaits            | J/k. k mol          |

| <b>LETTERS GRECS</b> |                                 |                |
|----------------------|---------------------------------|----------------|
| <b>Symbole</b>       | <b>Désignation</b>              | <b>Unité</b>   |
| $\mu_J$              | Coefficient de joule<br>Thomson | Sans dimension |

| <b>Indices</b> |                       |   |
|----------------|-----------------------|---|
| GAP            | Gaz de l'air pur      | - |
| GAN            | Gaz Nitrogène         | - |
| GOX            | Gaz oxygène           | - |
| LAP            | Liquide de l'air pure | - |
| LAN            | Liquide de nitrogène  | - |
| LOX            | Liquide de oxygène    | - |

|   |    |
|---|----|
| <b>Dédicace</b>   |    |
| <b>Remerciement</b>   |    |
| <b>Nomenclature</b>   |    |
| <b>Liste des figures</b>  |    |
| <b>Liste des tableaux</b>   |    |
| <b>Sommaire</b>   |    |
| <b>Résumé</b>   |    |
| <b>Introduction générale</b> .....  | 1  |
| <b>CHAPITRE I : CENTRALE DE L'OXYGENE</b>                                     |    |
| I.1. Introduction.....  | 3  |
| I.2.L'importance de l'oxygène pour traiter le COVID-19 .....                  | 4  |
| I.3.Estimation des besoins en oxygène .....                                   | 5  |
| I.4. Séparation des différents composants de l'air dans une unité CALGAZ..... | 8  |
| I.4.1. Généralités sur l'air.....   | 8  |
| I.4.2. Etats des différents composants.....                                   | 8  |
| I.4.3. Les étapes de production CALGAZ .....                                  | 9  |
| I.4.3.1. pré-refroidissement.....   | 10 |
| I.4.3.2. la purification .....  | 11 |
| I.4.3.3. l'échangeur.....   | 11 |
| I.4.3.4. le compresseur recyclag .....  | 12 |
| I.4.3.5. les turbines : (le turboexpander) .....                              | 12 |
| Terboexpander .....   | 12 |
| I.4.3.5.1. La turbine chaude .....  | 13 |
| A. Côté compresseur.....  | 13 |
| B. Côté turbine.....  | 13 |
| I.4.3.5.2. la turbine froide .....  | 14 |
| A. côté compresseur.....  | 14 |
| B. Côté turbine .....   | 14 |
| I.4.3.6. la vanne de joul Thomson .....                                       | 14 |
| I.4.3.7. les deux colonnes de distillation .....                              | 15 |
| A. la colonne inférieur.....  | 15 |
| B. la colonne supérieur .....   | 15 |
| I.4.3.8. stockage .....   | 16 |
| I.4.4. Schéma de l'unité de production d'oxygène CALGAZ .....                 | 17 |

## **CHAPITRE II: GÉNÉRALITÉ SUR LA CRYOGÉNIE ET DES GAZ L'AIR**

|   |    |
|---|----|
| II.1. Introduction .....  | 18 |
| II.2. Définition de la cryogénie .....                                | 18 |
| II.3. Historique et domaines d'utilisation de la cryogénie .....      | 18 |
| II.4. Technique de production des basses températures .....           | 20 |
| II.4.1. Effet de joule- Thomson : .....                               | 20 |
| II.4.2. Détente adiabatique (Expende) .....                           | 21 |
| II.5. Cycles de liquéfaction cryogénique .....                        | 23 |
| II.5.1. Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz .....                    | 23 |
| II.5.2. Cycle de Linde .....  | 24 |
| II.5.3. Cycle de liquéfaction de Linde avec pré-refroidissement ..... | 25 |
| II.5.4. Cycle de Linde à détente étagée .....                         | 26 |
| II.5.5. Cycle de Claude .....   | 26 |
| II.5.6. Système de liquéfaction de Kapitza .....                      | 27 |
| II.5.7. Cycle de liquéfaction de Collins (1952) .....                 | 28 |
| II.5.8. Cycle en cascade classique .....                              | 29 |
| II.6. Généralité sur l'air .....                                      | 30 |
| II.6.1. Composition de l'air .....                                    | 30 |
| II.6.2. Point d'ébullition des composants de l'air .....              | 31 |
| II.7. Propriétés de l'oxygène, de l'azote et de l'argon .....         | 33 |
| II.7.1. Propriétés de l'oxygène .....                                 | 33 |
| II.7.1.1. Principale application .....                                | 33 |
| II.7.2. Propriété de l'azote .....                                    | 34 |
| II.7.2.1. Principale application .....                                | 34 |
| II.7.3. Propriétés de l'argon .....                                   | 34 |
| II.7.3.1. Principale Application .....                                | 34 |

## **CHAPITRE III : GENERALITE SUR LA PRODUCTION D'OXYGENE PAR CRYOGENIE**

|  |    |
|--|----|
| III.1. Introduction .....              | 35 |
| III.2. Définition de l'oxygène .....   | 35 |
| III.2.1. Généralité .....              | 35 |
| III.2.2. Historique de l'oxygène ..... | 35 |
| III.2.3. Propriétés de l'oxygène ..... | 35 |
| III.3. Oxygène liquide .....           | 36 |
| III.3.1. Fabrication .....             | 37 |

|  |    |
|--|----|
| III.3.2. Utilisations .....  | 37 |
| III.3.3. Propriétés physiques et chimiques de l'oxygène liquide.....         | 38 |
| III.3.4. Expédition d'oxygène liquide.....                                   | 39 |
| III.3.5. Stockage :.....   | 40 |
| III.3.6. Considérations de sécurité . .....                                  | 40 |
| III.3.7. l'oxygène liquide médical . .....                                   | 41 |
| III.3.8. La différence entre l'oxygène médical et l'oxygène industriel ..... | 42 |
| Oxygène industriel.....  | 42 |
| L'oxygène médical.....   | 43 |
| III.4. Les Technologies de séparation de l'air .....                         | 43 |
| III.5. Séparation cryogénique de l'air : .....                               | 44 |
| III.5.1. Les étapes de base de la séparation cryogénique de l'air .....      | 44 |
| III.5.2. Schéma de principe d'une séparation cryogénique de l'air .....      | 45 |
| a)Aspiration et compression de l'air ambient .....                           | 46 |
| b)Pré-refroidissement avec de l'eau froid.....                               | 46 |
| c)L'épuration de l'air.....  | 46 |
| d)Le refroidissement de l'air .....  | 47 |
| e)Distillation et séparation .....   | 47 |
| III.6. Techniques générale utilisée pour la distillation.....                | 48 |
| a) Colonne de distillation nor.....  | 49 |
| b) Double colonne de Linde (sans argon) .....                                | 49 |
| III.7. Equipment pour la séparation cryogénique de l'air .....               | 51 |
| III.7.1. Compresseurs cryogéniques .....                                     | 51 |
| III.7.2. Les échangeurs .....  | 52 |
| III.7.3. Les régénérateurs .....   | 53 |
| III.7.4. Machines de détente cryogénique .....                               | 54 |
| a) le détendeur alternatif .....   | 54 |
| b)les turbines à paliers à gaz hydrostatiques ou hydrodynamiques.....        | 54 |
| III.7.5 Autres composants .....  | 55 |
| <b>CHAPITRE IV: LA SIMULATION ASPEN HYSYS</b>                                |    |
| IV.1. Introduction:.....   | 56 |
| IV.2. Modes de simulation :.....   | 57 |
| A. Mode d'état stable .....  | 57 |
| B. Mode dynamique: .....   | 57 |
| IV.3. Simulation d'équipement: .....   | 58 |

|   |    |
|---|----|
| IV.4. Simulateurs de procédés chimiques:.....       | 58 |
| IV.5. Simulation Description: .....                 | 58 |
| IV.6. Travailler avec des équipements de base:..... | 60 |
| IV.6.1. Pompe: .....                                | 60 |
| IV.6.2. Compresseur: .....                          | 61 |
| IV.6.3. Échangeur de chaleur:.....                  | 62 |
| IV.6.4. Colonne de distillation: .....              | 63 |
| IV.6.5. Navire: .....                               | 64 |
| IV.6.6. Tour d'absorption avec rebouilleur: .....   | 64 |
| IV.6.7. Separation: .....                           | 65 |
| IV.6.8. Chauffage:.....                             | 65 |
| IV.7. Candidatures: .....                           | 65 |
| IV.8. Avantages de HYSYS:.....                      | 66 |
| IV.9. Limites: .....                                | 66 |
| IV.10. Conclusions:.....                            | 67 |

## **CHAPITRE V PARTIE PRATIQUE ET DISCUSSION DES RESULTATS**

|   |    |
|---|----|
| V.1. Introduction .....                                       | 67 |
| V.2. Les étapes de simulation .....                           | 67 |
| V.2.1. Introduction les compositions .....                    | 67 |
| V.2.2. Choix de modèle d'équation d'état fluide package ..... | 68 |
| V.3. Composants de procédé .....                              | 68 |
| V.3.1. Avant recyclage.....                                   | 69 |
| V 3.1.1. Compresseur axial (k-100) .....                      | 69 |
| V.3.1.2. Le refroidisseur (Ac-100) .....                      | 70 |
| V.3.1.3. L'échangeur (E-101) .....                            | 71 |
| V.3.1.4. Le mixeur (mix-100) .....                            | 72 |
| V.3.1.5. Le compresseur (k-101) .....                         | 74 |
| V.3.1.6. Le refroidissement .....                             | 75 |
| V.3.1.7. Le séparateur (TEE-100) .....                        | 76 |
| V.3.2. Le recyclage .....                                     | 77 |
| V.3.2.1. Le compresseur de recyclage d'air (k-103) .....      | 77 |
| V.3.2.2. le refroidissement (Ac-102) .....                    | 78 |
| V.3.2.3. Le compresseur .....                                 | 79 |
| V.3.2.4. Le refroidissement .....                             | 80 |
| V.3.2.5. L'échangeur (E-102) .....                            | 81 |

|  |     |
|--|-----|
| V.3.2.6. La compresseur (k-105) .....  | 82  |
| V.3.2.7. L'échangeur .....   | 83  |
| V.3.2.8. Le compresseur (k-102) .....  | 84  |
| V.3.2.9. L'échangeur (E-104) .....   | 85  |
| V.3.2.10. Le recycleur (RCY-1) .....   | 86  |
| V.3.3. La distillation .....   | 87  |
| V.3.3.1. colonne de distillation (lower colonne T-100) .....                                     | 87  |
| V.3.3.2. Le séparateur (TEE-102) .....   | 88  |
| V.3.3.3. La vanne joule Thomson (VLV-102) .....  | 89  |
| V.3.3.4. La vanne joule Thomson (VLV-100) .....  | 90  |
| V.3.3.5. La vanne joule Thomson (VLV-101) .....  | 91  |
| V.3.3.6. colonne de distillation (uper colonne T-102) .....                                      | 92  |
| V.4 .Schéma globale .....  | 93  |
| V.5.Calcul des bilans énergétiques .....   | 95  |
| V.5.1.Discussion des résultats de simulation .....   | 96  |
| V.5.2. Suggestion pour améliorer le processus de production d' $O_2$ en utilisant $N_2$ WEST ... | 97  |
| V.5.3. Remarque.....   | 99  |
| Conclusion générale.....   | 100 |

## Le résumé.

L'accès à l'oxygène liquide nécessite une séparation des gaz de l'air, Pour séparer l'air il faut le liquéfier.

Dans ce projet, nous suivons la simulation de la liquéfaction de l'air en utilisant le logiciel de simulation HYSYS.

Ce travail vise à simuler le cycle cryogénique de Claude à l'aide de l'instrument HYSY, et les résultats obtenus sont satisfaisants.

**Les mots clés :** Séparation d'air, liquéfaction, colonne de distillation, simulation, simulateur HYSYS.

## Abstract

Access to liquid oxygen requires gas separation from air, To separate air, it must be liquefied.

In this project, we follow the simulation of air liquefaction using the simulation software HYSYS

This work aims to simulate the Claude cryogenic cycle using the HYSYS tool, and the results obtained are satisfactory.

**Key words:** Air separation, liquefaction, distillation column, simulation, HYSYS simulator.

## الملخص:

يتطلب الوصول الى الاكسجين السائل فصل غازات الهواء، لفصل الهواء من الضروري تسييله.

في هذا المشروع نتبع محاكاة تسييل الهواء عن طريق استخدام برنامج محاكاة **HYSYS**.

ويهدف هذا العمل لمحاكاة الدورة **Claude** باستخدام أداة وقد كانت النتائج المتحصل عليها مرضية.

الكلمات المفتاحية : فصل الهواء، التسييل، عمود التقطير، المحاكاة، **HYSYS**.

# **INTRODUCTION GENERALE**

# Introduction générale

---

## Introduction générale:

L'histoire de la séparation d'air est connue depuis longtemps, à l'échelle de la recherche et au niveau du laboratoire la première liquéfaction de l'air [L. Cailletet et R. Pictet, 1877] et la première séparation de l'oxygène et de l'azote [K. Olszewski et S. Wroblewski, en 1883] furent rapidement suivies par la liquéfaction de l'hydrogène, rendue possible par l'invention d'un réservoir isolé sous vide avec écran de rayonnement [J. Dewar, 1898]. Cependant, ce fut la première liquéfaction de l'hélium [H. Kamerlingh Onnes, 1908] qui a ouvert la voie de la recherche sur la matière condensée aux basses températures [1].

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

La liquéfaction des gaz de l'air est l'une des procédés les plus complexes dans l'industrie qui nécessite des très basses températures. Parmi les techniques les plus utilisées pour la production du froid : la vanne de Joule-Thomson et la détente adiabatique (la turbine).

C'est à l'aide de la distillation qu'on a pu réaliser la séparation des gaz de l'air par l'intermédiaire des colonnes de distillation cryogénique.

Parmi les gaz industriels, l'oxygène est le gaz prédominant, en raison de ses utilisations larges et variées, dans notre étude actuelle. Nous nous intéressons à la production de ce gaz à partir de l'air (plus précisément, par liquéfaction de l'air). Nous sommes basés sur le système à double colonne de Linde.

L'objectif de notre travail est d'étudier et simuler à partir de logiciel Aspen hysys le cycle de Claude, afin d'avoir l'oxygène liquide.

Pour cela, notre travail est devisé en cinq parties :

Le première chapitre est consacré à présenter le besoin d'oxygène au temps de corona et le centrale fabrication d'oxygène (unité de séparation d'air).

Le deuxième chapitre présenter quelques techniques de production des basses températures, des généralités sur la cryogénie, les cycles de la liquéfaction en fin les gaz de l'air et leur propriétés et applications

## **Introduction générale**

---

Le troisième chapitre basé sur la production d'oxygène liquide par cryogénie et les équipements cryogéniques mis en jeux.

Le quatrième chapitre constitue une présentation globale de la simulation le simulateur Aspen hysys.

Le dernier chapitre consacré aux applications ainsi qu'à la présentation des résultats de simulation.

En termine par une conclusion générale qui résume l'essentiel de ce travail.

# **CHAPITRE I : CENTRALE DE L'OXYGENE**

## **I.1. Introduction:**

L'oxygénothérapie médicale est un élément essentiel du traitement des patients atteints de COVID-19 sévère. En particulier dans les pays à revenu faible et intermédiaire (PRITI), où l'approvisionnement risque d'être insuffisant face à la pandémie, l'amélioration de l'accès à l'oxygène médical peut sauver des vies.

Une grande partie du débat politique concernant les équipements médicaux COVID-19 se concentre sur la question de savoir quelle forme d'assistance respiratoire du patient est efficace dans les milieux à faibles ressources. Cependant, quelle que soit la forme spécifique d'assistance respiratoire utilisée, le fonctionnement à long terme et rentable de toutes les formes d'oxygénothérapie nécessite un système approprié pour fournir de l'oxygène aux hôpitaux.

L'approvisionnement durable et abordable en oxygène médical des hôpitaux a longtemps été négligé dans les services de santé, en particulier dans les PRITI. Avec l'attention accrue portée à l'approvisionnement en oxygène par le COVID-19, il est possible de construire une infrastructure adéquate pour fournir de l'oxygène de manière systématique.[2]

Déjà présente à Laghouat (centre), Calgaz, qui a été créée en 2018, fonctionne avec un système de dernière génération. Grâce à ses deux sites, l'entreprise affiche une production journalière de 400 tonnes.

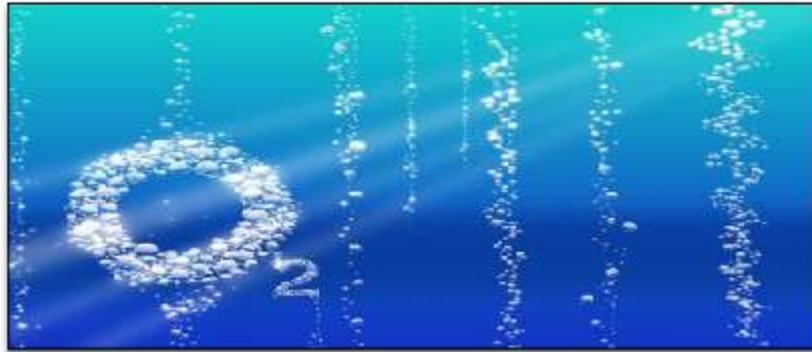
Mais l'ambition des trois frères Kerchouche, créateurs de K3A en 1984, ne s'arrête pas là. Ils envisagent d'ouvrir, entre 2019 et 2021, d'autres usines du même type à Adrar, Amenas et Mascara. Ils espèrent ainsi porter la production de Calgaz à 1 000 tonnes par jour d'azote, d'oxygène, mais aussi d'argon, un gaz classé dans la catégorie des gaz nobles. Une capacité qui effectivement permettra d'imposer Calgaz sur le marché national dominé pour l'instant par des groupes étrangers et de devenir ainsi le premier producteur algérien d'azote et d'oxygène. Des investissements qui, à court terme, autoriseront Calgaz "à s'engager à l'export vers le marché africain", déclare Algérie Online.



**Figure I.1: Calgaz-Algérie exporte de l'oxygène médicale.**

### **I.2.L'importance de l'oxygène pour traiter le COVID-19:**

Le virus SRAS CoV-2 provoque une pneumonie et une hypoxémie liées au COVID-19. L'hypoxémie est un manque d'oxygène dans le sang - la complication la plus importante de la pneumonie COVID-19 et une cause majeure de décès. Quelques médicaments antiviraux ont été efficaces dans le traitement de l'infection au COVID-19, mais dans les pneumonies graves, l'oxygène soulage l'hypoxémie. Cela peut laisser le temps à l'infection de disparaître et aux poumons de guérir. Pour de nombreuses personnes touchées par le COVID-19, l'oxygène est vital.[3].



**Figure I.2: L'oxygénation pulmonaire au temps de la COVID19.**

### **I.3.Estimation des besoins en oxygène:**

Un autre aspect de la sélection de la source d'oxygène la plus appropriée consiste à prendre en considération les débits bruts d'oxygène qui seront nécessaires pour le traitement. Pour déterminer les besoins de flux totaux, il faut estimer la charge de travail prévue.

Cela peut être fait à l'aide de l'outil de prévision de l'approvisionnement essentiel (ESFT) [4] COVID-19 de l'OMS.[4] À partir du nombre total de patients attendus, le rapport de gravité des patients peut être attribué comme indiqué ci-dessus : léger, modéré, sévère ou critique. Ainsi, les débits nécessaires peuvent être estimés pour répondre aux besoins d'oxygénothérapie des patients hospitalisés sévères et critiques, représentant 20% du total.

Environ 75 % des patients COVID-19 nécessitant une hospitalisation seront classés comme « graves » et 25 % comme « critiques ». Ainsi, l'approvisionnement total en oxygène médical requis peut être estimé sur la base des débits recommandés pour chaque catégorie de gravité de patient (indiqué dans le tableau 1 ci-dessous).

**Tableau I.1: Exemple de planification du débit d'oxygène par établissement de 100 Lits.**

| Hypothetical 100 bed COVID-19 treatment facility |                               |                               |                             |                            |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Disease severity                                 | Avg. O <sub>2</sub> flow rate |                               | Size of solutions of scale* |                            |
|  | per patient                   | Total                         | PSA Plant                   | Bulk liquid                |
| Severe<br>75 patients                            | 10 L/min                      | 75 * 10 * 60<br>= 45,000 L/hr | = 45 m <sup>3</sup> /hr     | = 1.25 m <sup>3</sup> /day |
| Critical<br>25 patients                          | 30 L/min                      | 25 x 30 x 60<br>= 45,000 L/hr | = 45 m <sup>3</sup> /hr     | = 1.25 m <sup>3</sup> /day |
|  |                               |                               | = 90 m <sup>3</sup> /hr     | = 2.5 m <sup>3</sup> /day  |

Cet exemple de scénario est basé sur un nombre de patients. Une quantification typique de cette nature serait calculée en fonction de la disponibilité de l'équipement. Il est important de réévaluer les besoins une fois que l'équipement a été mis en service, car il est probable qu'il y aura des changements spécifiques à l'équipement dans la demande.

Toute ventilation assistée implique un mélange d'air médical et d'oxygène. Les débits pour les patients critiques indiqués ici ne représentent que la portion d'oxygène du débit de gaz total nécessaire pour atteindre la fraction thérapeutique cible d'oxygène inspiré (FiO<sub>2</sub>), qui est 1 % total d'oxygène dans les poumons disponible pour l'échange de gaz. La FiO<sub>2</sub> changera au cours d'un traitement et variera d'un patient à l'autre. Le débit d'oxygène indiqué ici représente une moyenne de la proportion de débits d'oxygène au cours du temps d'un patient sous ventilation assistée. Une équation simple pour déterminer la proportion de débit à tout moment est la suivante :

$$T \text{ arget } FiO_2 = \frac{O_2 \text{ L/min} + (\text{air L/min} \times 21\%)}{\text{Total flow, L/min}}$$

L'OMS COVID-19 ESFT [4] peut également aider à estimer d'autres besoins qui devront être inclus, tels que les dispositifs auxiliaires, les accessoires, les consommables et les pièces de rechange, etc. Ces outils et autres documents associés peuvent être trouvés sur le site Web de l'OMS :

**Tableau I.2 : Description et comparaison des sources d'oxygène et du stockage [5].**

|  | Cylinders  | Concentrateurs (PSA)   | Usine d'oxygène (PSA)  | Oxygène liquide  |
|--|--|--|--|--|
| La description                               | Réceptif de stockage cylindrique rechargeable utilisé pour stocker et transporter l'oxygène sous forme de gaz comprimé. Les bouteilles sont remplies dans une usine de production de gaz et doivent donc être transportées vers et depuis l'usine.   | Dispositif médical autonome à alimentation électrique conçu pour concentrer l'oxygène de l'air ambiant, en utilisant la technologie PSA.   | Un système de génération d'oxygène sur site utilisant la technologie PSA, qui fournit de l'oxygène à haute pression dans une installation via un système de canalisation central ou via des bouteilles remplies par l'usine.   | Oxygène liquide en vrac généré hors site et stocké dans un grand réservoir et fourni via un système de canalisations d'établissements de santé. Le réservoir doit être rempli par un fournisseur d'oxygène liquide.  |
| Application clinique et/ou cas d'utilisation | Peut être utilisé pour tous les besoins en oxygène, y compris l'alimentation à haute pression et dans les installations où l'alimentation électrique est intermittente ou peu fiable. Également utilisé pour le service ambulatoire ou le transport de patients. Utilisé comme sauvegarde pour d'autres systèmes | Utilisé pour fournir de l'oxygène au chevet du patient ou à proximité immédiate des zones du patient. Un seul concentrateur peut desservir plusieurs lits avec l'utilisation d'un support de débitmètre pour diviser le débit de sortie. | Peut être utilisé pour tous les besoins en oxygène, y compris l'alimentation haute pression  | Peut être utilisé pour tous les besoins en oxygène, y compris l'alimentation à haute pression et dans les installations où l'alimentation électrique est intermittente ou peu fiable.  |
| Mécanisme de distribution                    | Connecté au collecteur du système de distribution de pipeline central/sous-central, ou directement connecté au patient avec débitmètre et tubulure.  | Directement sur le patient avec une tubulure ou via un support de débitmètre.  | Système de distribution de pipeline central/sous-central, ou peut être utilisé pour remplir des bouteilles qui peuvent être connectées à des systèmes de collecteurs dans l'installation.  | Système central de distribution par pipeline.  |
| Besoin en électricité                        | Non  | Ok   | ok   | Non  |
| Exigence d'entretien                         | Entretien limité requis par des techniciens qualifiés.   | Entretien modéré requis par des techniciens formés, qui pourraient être internes.  | Un entretien important du système et de la tuyauterie requis par des techniciens et des ingénieurs hautement qualifiés peut être fourni dans le cadre du contrat.  | Un entretien important du système et de la tuyauterie requis par des techniciens et des ingénieurs hautement qualifiés peut être fourni dans le cadre du contrat.  |
| Service à l'utilisateur                      | Modéré; vérifications régulières des raccords et connexions, vérifications régulières des niveaux d'oxygène, nettoyage extérieur.  | Modéré; nettoyage des filtres et de l'extérieur de l'appareil.   | Minimal; à l'unité terminale uniquement.   | Minimal; à l'unité terminale uniquement.   |
| mérites                                      | – Aucune source d'alimentation.  | – Alimentation continue en oxygène (si puissance disponible) à faible coût de fonctionnement.<br>– Le flux de sortie peut être réparti entre plusieurs patients.   | – Peut être rentable pour les grandes installations.<br>– Alimentation continue en oxygène   | – 99% d'oxygène obtenu.<br>– Débit d'oxygène élevé pour un faible encombrement.  |
| Désavantages                                 | – Nécessite un transport/une chaîne d'approvisionnement.<br>– Alimentation épuisable.<br>– Très dépendant du fournisseur. – Risque de fuite de gaz. – Risque de délocalisation non souhaitée.  | – Sortie basse pression, généralement inadaptée aux CPAP ou aux ventilateurs. – Nécessite une alimentation ininterrompue.<br>– Nécessite une alimentation de secours en bouteille. – Nécessite un entretien.                             | – Investissements en capital élevés.<br>– Nécessite une alimentation ininterrompue. Nécessite une infrastructure adéquate.<br>– Entretien élevé de la tuyauterie.<br>– Nécessite une alimentation de secours en bouteille.<br>– Risque de fuite de gaz du système de tuyauterie. | – Nécessite un transport/une chaîne d'approvisionnement.<br>– Alimentation épuisable.<br>– Entretien élevé de la tuyauterie.<br>– Nécessite une infrastructure adéquate.<br>– Nécessite une alimentation de secours en bouteille.<br>– Risque de fuite de gaz du système de tuyauterie |

## I.4. Séparation des différents composants de l'air dans une unité CALGAZ:

### I.4.1. Généralités sur l'air :

L'air est un mélange des gaz, constitué principalement d'azote (78 %), oxygène (21 %) et de gaz inerte l'argon (0.9 %), le reste (0.1 %) se compose la plupart du temps de l'anhydride carbonique CO<sub>2</sub> et d'autres gaz inertes néon, hélium, krypton et xénon. L'air peut être séparé par la distillation dans les unités spéciales.

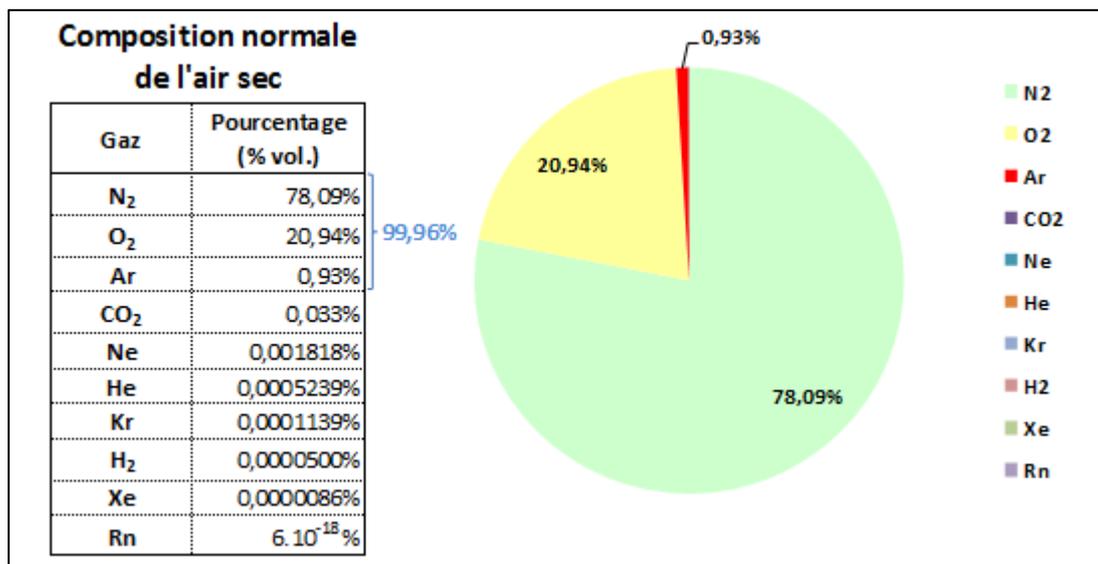


Figure I.3: composants de l'air.

### I.4.2. Etats des différents composants:

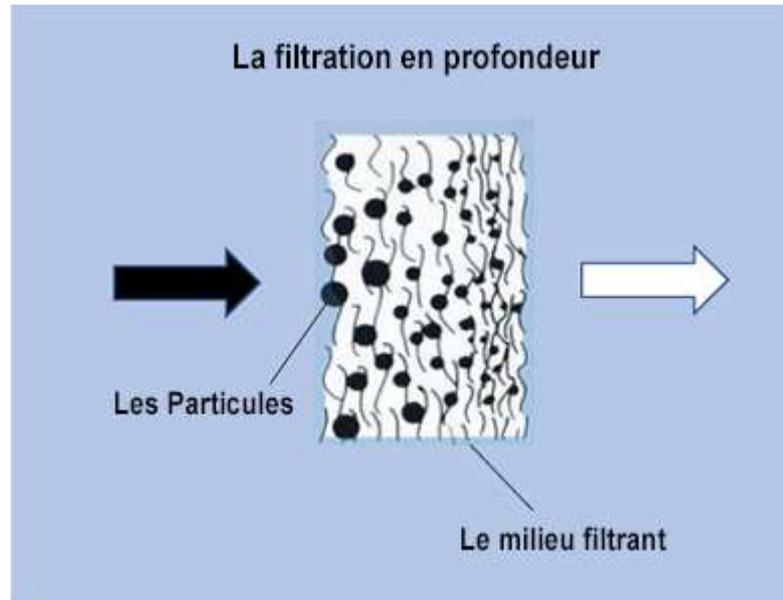
Tous les éléments qui composent l'air le sont sous forme gazeuse. Cependant, leur température d'ébullition est changeante. Voici un tableau qui les récapitule :

**Tableau I.3 : Température d'ébullition des gaz l'air.**

| Nom                | Température  |
|--------------------|--------------|
| Hélium             | - 268,93 °C  |
| Dihydrogène        | - 252,76 °C  |
| Néon               | - 246,053 °C |
| Diazote            | - 195,79 °C  |
| Argon              | - 185,85 °C  |
| Dioxygène          | - 183 °C     |
| Méthane            | - 161,52 °C  |
| Krypton            | - 154,34 °C  |
| Monoxyde d' azote  | - 151,8 °C   |
| Ozone              | - 111,9 °C   |
| Xénon              | - 108,09 °C  |
| Protoxyde d' azote | - 88,5 °C    |
| Radon              | - 61,7 °C    |
| Dioxyde de carbone | - 56,6 °C    |
| Dioxyde d'azote    | 21,2 °C      |

#### **I.4.3. Les étapes de production CALGAZ:**

-Deux filtres à poussière chacun en forme:



**Figure I.4: Unité de filtres à poussière.**

- La différence de pression entre les deux:

- ✓ Le premier filtre 1.24 mbar.
- ✓ Le deuxième filtre 3.34 mbar.

- Trois étages de compression:

- ✓ Et un refroidissement avec l'eau froide entre un étage et l'autre.
- ✓ La pression de sortie pour le compresseur principal c'est 5.14 bar.
- ✓ la température de l'air imprimer 32 °C.
- ✓ Le débit : 14221 Nm<sup>3</sup>/h.

#### **I.4.3.1. pré-refroidissement :**

C'est un refroidissement par le contact de l'air et l'eau froide dans la première colonne est l'eau avec le west nitrogen dans la deuxième colonne.

- ✓ azote qui Contient des traces d'oxygène environ 13 ppm oxygène.
- ✓ La température de L'air sortie de pré refroidissement : 8 .6 °C.

### I.4.3.2. la purification :

-Élimination de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O : par les Tamis moléculaire et alumina.



Figure I.5: Unité d'élimination des impuretés.

Le premier A travaillé et le second B travaille sur la pureté des impuretés restées puis l'inverse Ils travaillent en rotation pendant 8 heures.

### I.4.3. 3- l'échangeur :

-Le transfert de chaleur entre l'air chaud et l'air froid.



Figure I.6: Unité de l'échangeur.

-L'air chaud provenir de :

- ✓ les deux compresseurs de turboexpander.
- ✓ pré-refroidissement.
- ✓ le compresseur recyclage.

- L'air froid provenir de:

- ✓ west nitrogen.
- ✓ les deux Turbin de turboexpander.

#### **I.4.3.4 le compresseur recyclage :**

-Comme le premier compresseur 3 étage de compression



**Figure I.7: Le compresseur recyclage a 26 bars.**

- Les paramètres sortie c'est :

- ✓ Pression : 20.64 bar.
- ✓ Température : 35.5 °C.
- ✓ Début : 32004 Nm<sup>3</sup>/h.

#### **I.4.3.5. les turbines : (le turboexpander):**

##### **Terboexpander :**

Une turbine d'expansion, également appelée turbodétendeur ou turbine de détente, est une turbine centrifuge ou à écoulement axial, à travers laquelle un gaz à haute pression est détendu pour produire un travail qui est souvent utilisé pour entraîner un compresseur ou un

générateur ; les turbodétendeurs sont aussi l'étage essentiel du procédé Claude de liquéfaction de gaz tels que l'oxygène, l'azote, l'hélium, l'argon et le krypton.



**Figure I.8: Turboexpander.**

Les turbines d'expansion sont largement utilisées comme sources de réfrigération dans des processus industriels tels que l'extraction d'éthane et d'autres hydrocarbures du gaz naturel.

On a deux turboexpander Afin de créer un refroidissement séquentiel.

#### **I.4.3.5.1. La turbine chaude :**

##### **A. Côté compresseur :**

- ✓ Pression d'entrée 20.36 bar.
- ✓ Pression de sortie :25.9 bar T=25.89 °C.
- ✓ La température des roulements 53 °C.
- ✓ La vibration 3.8 um.

##### **B. Côté turbine :**

- ✓ La température T la pression d'entrée : p= 20.15 bar T=-19.1 °C.
- ✓ La température et la pression de sortie : p= 5 bar T=-88.66 °C.

Et ce phénomène ce qu'on appelle (la détente : chute de pression => chute de température)  $PV=NRT...$   $P=NRT/V$  ... N ,R et V est alors Lorsque la pression diminue, la température diminue:

- ✓ La température des roulements :  $T=55^{\circ}\text{C}$ .
- ✓ La vibration : 5.3  $\mu\text{m}$ .

#### **I.4.3.5.2. la turbine froide :**

##### **A. côté compresseur:**

- ✓ Pression d'entrée 25.75 bar.
- ✓ Pression de sortie :33.68 bar  $T=34^{\circ}\text{C}$ .
- ✓ La température des roulements  $56^{\circ}\text{C}$ .
- ✓ La vibration 8.5  $\mu\text{m}$ .

##### **B. Côté turbine :**

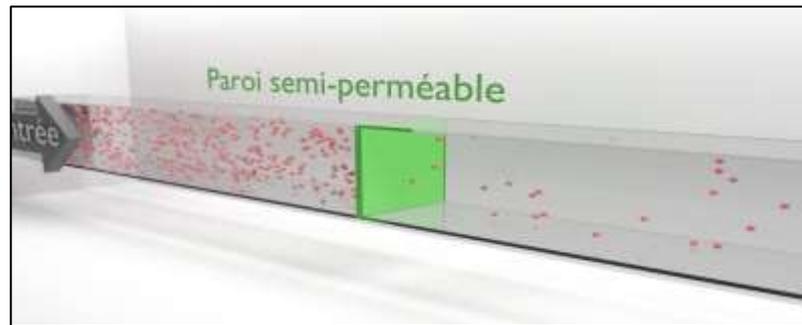
- ✓ La température et la pression d'entrée :  $p= 33.29$  bar  $T=-109.6^{\circ}\text{C}$ .
- ✓ La température et la pression de sortie :  $p= 5.02$  bar  $T=-168.2^{\circ}\text{C}$ .

Et ce phénomène ce qu'on appelle (la détente : chute de pression => chute de température)  $PV=NRT...$   $P=NRT/V$  ... N ,R et V est alors Lorsque la pression diminue, la température diminue.

- ✓ La température es roulements :  $T=59^{\circ}\text{C}$ .
- ✓ La vibration : 15  $\mu\text{m}$ .

#### **I.4.3.6. la vanne de joul Thomson :**

En physique, l'effet Joule-Thomson, également appelé effet Joule-Kelvin, est un phénomène lors duquel la température d'un gaz diminue lorsque ce gaz subit une expansion adiabatique.



**Figure I.9: Détente de Joule Thomson d'un gaz parfait.**

L'effet a été baptisé d'après les physiciens James Prescott Joule et William Thomson (Lord Kelvin).

Ce dernier établit l'existence de cet effet en 1852 en poursuivant les travaux de Joule sur l'expansion de Joule, lors de laquelle un gaz subit une expansion à enthalpie constante.

#### **I.4.3.7. les deux colonnes de distillation :**

-Après la vanne de jouleThomson on a 2 colonnes de distillation :

##### **A. La colonne inférieur:**

L'azote est liquéfié par la distillation à l'aide d'un condenseur à -196 degrés.

##### **B. La colonne supérieur :**

L'oxygène est liquéfié à aide d'une vanne de joule Thomson et stabiliser par une douchette d'azote a 183°C.

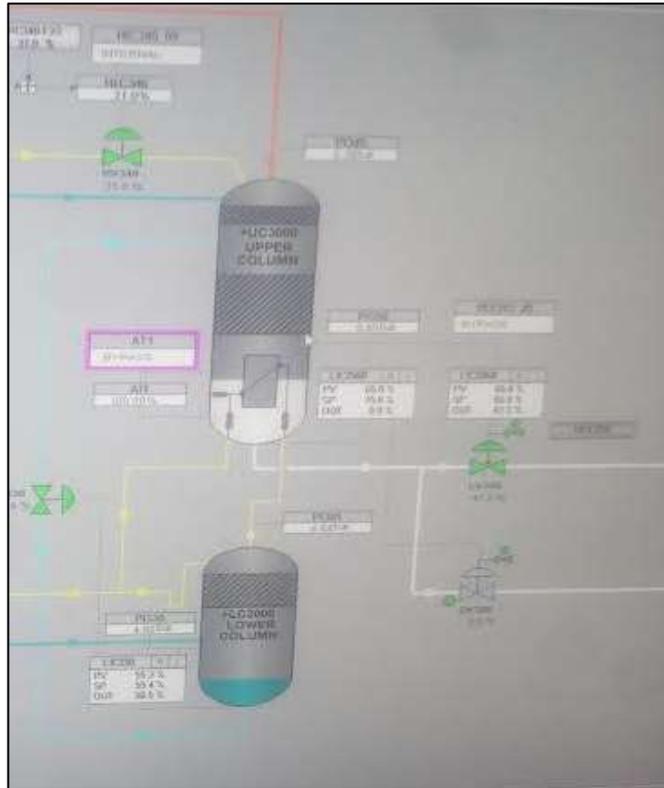


Figure I.10: La colonne distillation de l'air ( $O_2$  et  $N_2$ ).

#### I.4.3.8 stockage:

L'oxygène est stocké sous forme liquide 0.9 bar dans un back a une capacité de 250  $m^3$ .



Figure I.11: Stockage d'oxygène.

I.4.4. Schéma de l'unité de production d'oxygène CALGAZ:



Figure I.12: l'unité de production d'oxygène CALGAZ

**CHAPITRE II: GÉNÉRALITÉ SUR  
LA CRYOGÉNIE ET DES GAZ L'  
AIR**

## II.1 Introduction :

Avoir de très basses températures, c'était l'objectif de grands nombres de chercheurs scientifiques et de physiciens dans ce chapitre on va expliquer les techniques de production des basses températures et les généralités sur la cryogénie les cycles de liquéfaction, l'air et leurs compositions et les principales applications à chaque composent.

## II.2 Définition de la cryogénie :

La cryogénie est l'étude et l'utilisation de substances à des températures extrêmement basses.

La limite supérieure de la température à basses température n'est pas fixée, mais l'institut de national de la standardisation et de technologie des Etats Unis recommande que le terme la basse température s'applique à toutes les températures inférieures à  $-150^{\circ}\text{C}$  ( $123^{\circ}\text{K}$ )

Certains scientifiques utilisent le point d'ébullition normal de l'oxygène ( $-183^{\circ}\text{C}$  ou  $90^{\circ}\text{K}$ ) comme limite supérieure[1].

## II.3 Historique et domaines d'utilisation de la cryogénie :

Avoir des températures très basses est l'objectif d'un grand nombre de chercheurs scientifiques et physiciens. Dès la première liquéfaction de l'air (L. Cailletet et R. Picret 1877) [2-3] et la première séparation de l'oxygène et l'azote (K. Olszewski et S. Wroblewsk 1883) [4] a été suivi par la liquéfaction de l'hydrogène a été réalisée en inventant un réservoir isolant vide avec écran de rayonnement (j. Dewar : 1898) [5-6] Durant cette période, il était la première liquéfaction de l'hélium (h. Kamerlinghones, 1908) [7] ouvert la voie de la recherche sur la matière condensée à basse température est toujours un aspect majeur de la recherche aujourd'hui et a conduit à des découvertes nouveaux phénomènes comme la supraconductivité (H. Kkamerlinghones, 1911) [8] et la superfluidité (w. Hkessom, 1928), seulement dans la seconde moitié du xxe siècle, avec l'avine ment de la mécanique quantique. Fait intéressant, la plupart des expériences de physique à l'époque étaient menées par des chercheurs indépendants utilisant du petit matériel, le laboratoire de H. Kamerlinghones à lédien est le premier exemple de recherche scientifique 'à grande échelle', alors que la cryogénie continue d'évoluer vers les températures de plus basses (figure 2) atteignent désormais des valeurs basses  $\sim 0.1 \text{ nk}$  dans les laboratoires spécialisés en raisonde la combinaison de technologies dilution à l'hélium [9] et démagnétisation adiabatique [10-14].

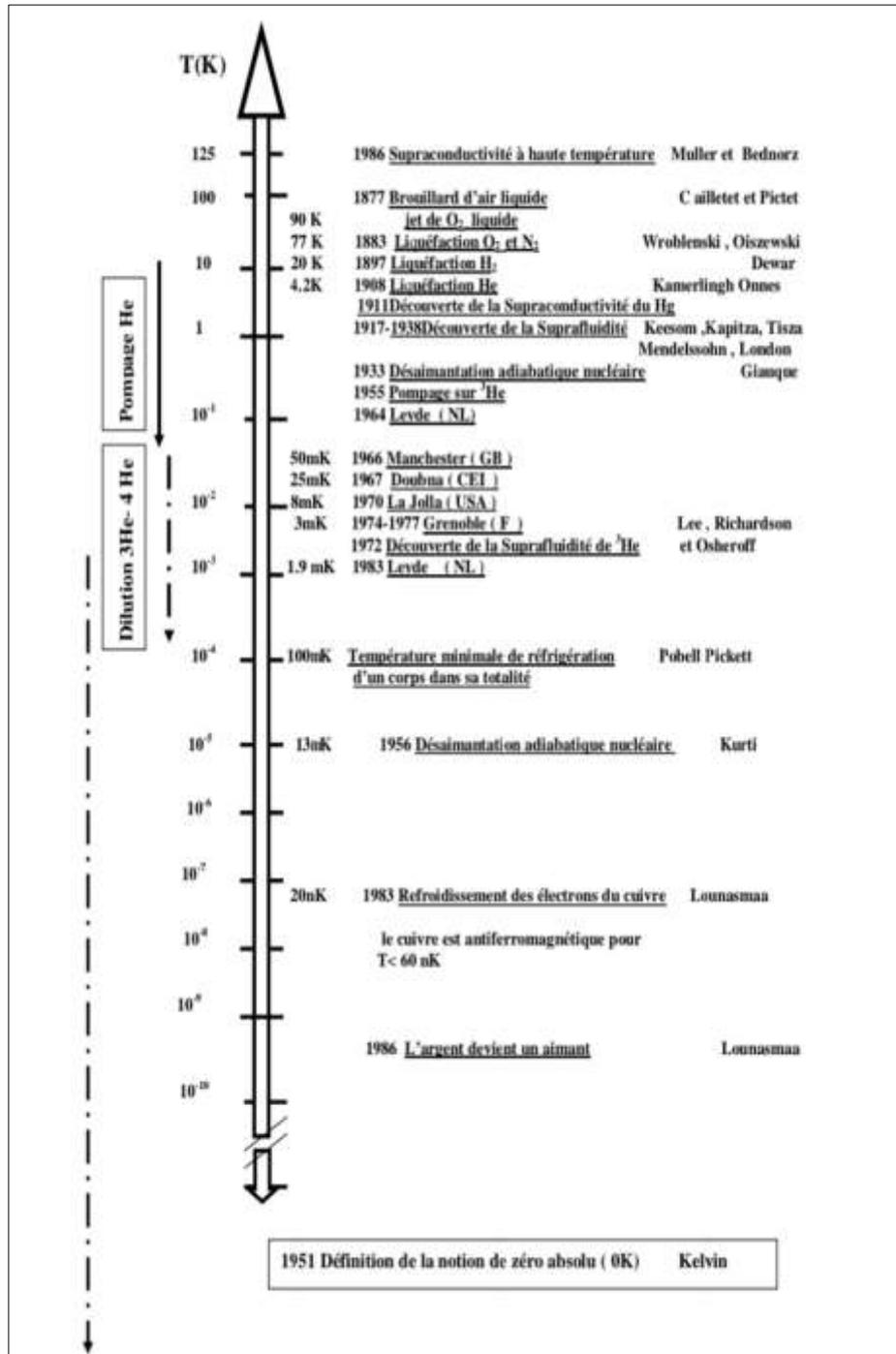


Figure II.1: Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs.

## II.4 Technique de production des basses températures : [15]

### II.4.1 Effet de joule- Thomson :

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

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

Le travail de transvasement est :

$$W = P_2 V_2 - P_1 V_1$$

La variation d'énergie interne est alors :

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

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

$$H_2 = H_1$$

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

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

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

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

$$dH = \partial Q + VdP = 0$$

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

$$Q = C_p dT + h dp$$

Avec  $C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_P$  : chaleur spécifique à pression constant.

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

D'où  $C_p dT + (H + V) dP = 0$

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

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

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

D'où l'expression du coefficient  $\mu_J - T$

$$\mu_J - T = \frac{-T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P - V}{C_p}$$

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

#### II.4.2 Détente adiabatique (Expender) :

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

$$\mu_S = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S$$

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

Ce coefficient se calcule comme suite :

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

D'où 
$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P = \frac{\partial Q}{T} \frac{1}{dT} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_P = \frac{c_p}{T}$$

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

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

D'où 
$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

Alors 
$$\mu_S = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

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

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

La détente isentropique, pour une même température de départ et entre deux pressions données, provoque un abaissement de température plus important que la détente isenthalpique, (le coefficient  $J - T : \mu_j - T = \frac{V}{c_p} - \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$  : est plus petit que le coefficient  $\mu_S = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$

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

## II.5 Cycles de liquéfaction cryogénique : [16]

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

Transférer dans la chaleur entre in fluide chaud et un fluide froid via un échangeur de chaleur.

Pomper sur un bain liquide en équilibre avec sa vapeur cela a pour effet d'abaisser la pression du fluide et donc la température en suivant la ligne de saturation base liquide grâce liquide gaz/liquide.

Effectuer une détente isenthalpique, souvent appelée détente joule Thomson ( $dh = 0$ ). Cela consiste à détendre le gaz à travers un orifice. Si cette détente s'effectue au-dessous de la température d'inversion, s'accompagner dan refroidissement de gaz (la température d'invention de l'hélium et d'environ 40K).

Extraire dans la chaleur via un travail extérieur sur une turbine ou un piston transformation ils ont trompé les isentropique = 0 ).

### II.5.1 Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz :

Le cycle idéal de liquéfaction correspond à celui mis en jeu dans un processus idéal, composé des transformations :

- Une compression isotherme entre l'état 1 et l'état 2.
- Une détente isentropique de l'état 2 vers l'état f (état de liquide saturé).

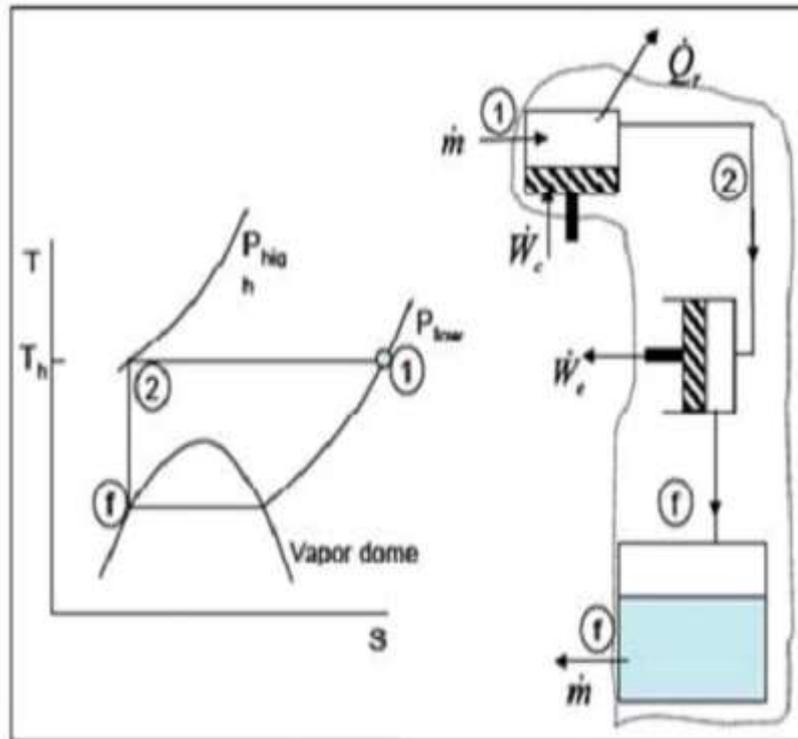


Figure II.2 : Cycle idéal de liquéfaction d'un gaz.

### II.5.2 Cycle de Linde :

C'est un cycle de liquéfaction qui utilise une détente isenthalpique (De Joule-Thomson) néanmoins, il nécessite au préalable un refroidissement permettant d'abaisser la température de gaz au-dessous de la température d'inversion de Joule- Thomson. Après la détente de joule- Thomson, on obtient une fraction  $y$  de liquide et une fraction  $1-y$  de vapeur.

Ce système est composé de ces transformations :

De l'état 1 vers l'état 2 : une compression isotherme.

De l'état 2 vers l'état 3 : un refroidissement isobare.

De l'état 3 vers l'état 4 : une détente isenthalpique.

De l'état 4 vers l'état 5 (point g) : un réchauffement isobare du gaz non liquéfier (refus de liquéfaction).

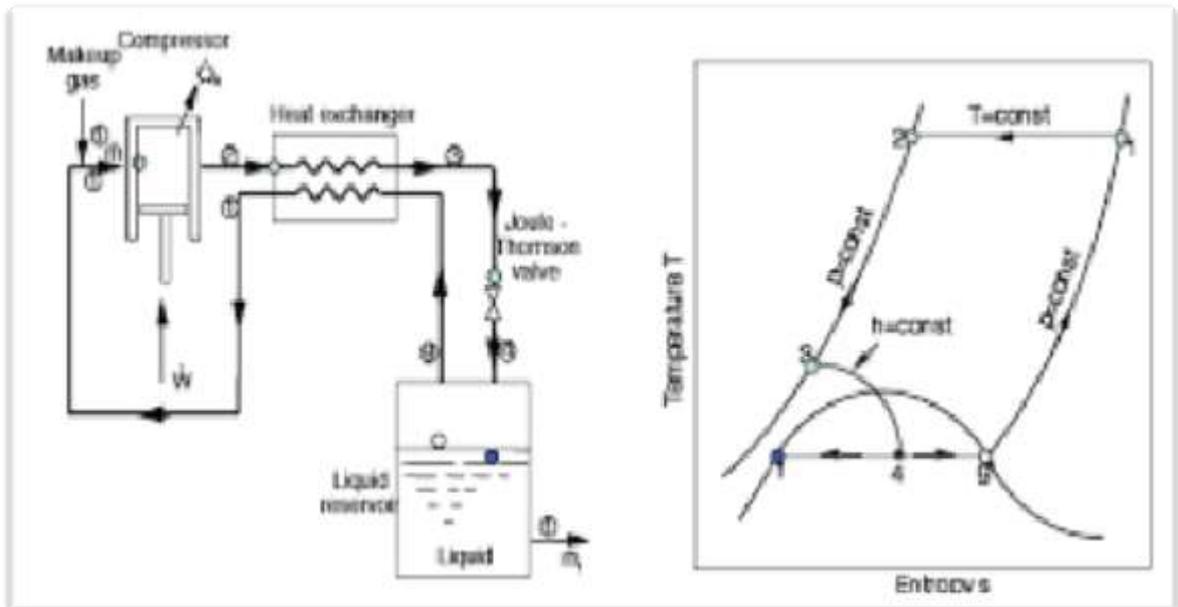


Figure II.3 : cycle de liquéfaction de Linde.

### II.5.3 Cycle de liquéfaction de Linde avec pré-refroidissement :

La performance de système de Linde (augmentation de taux de liquéfaction  $y$ ) peut être améliorée de sorte que le gaz à l'entrée de l'échangeur (refroidissement isobare) état 2 sort à une température inférieure à celle de l'ambiance. Pour ce faire, on rajoute un système de refroidissement utilisant soit de  $\text{CO}_2$ , soit de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) Ou les fréons afin de refroidir le gaz en sortie de compression.



partiellement refroidit dans l'échangeur de chaleur '1' qu'on envoi dans la turbine pour y subir une détente isentropique, cette turbine fournit une puissance 'W E' et ce gaz refroidit rejoint en (oint 7), la ligne montante des gaz frais (refus de liquéfaction).

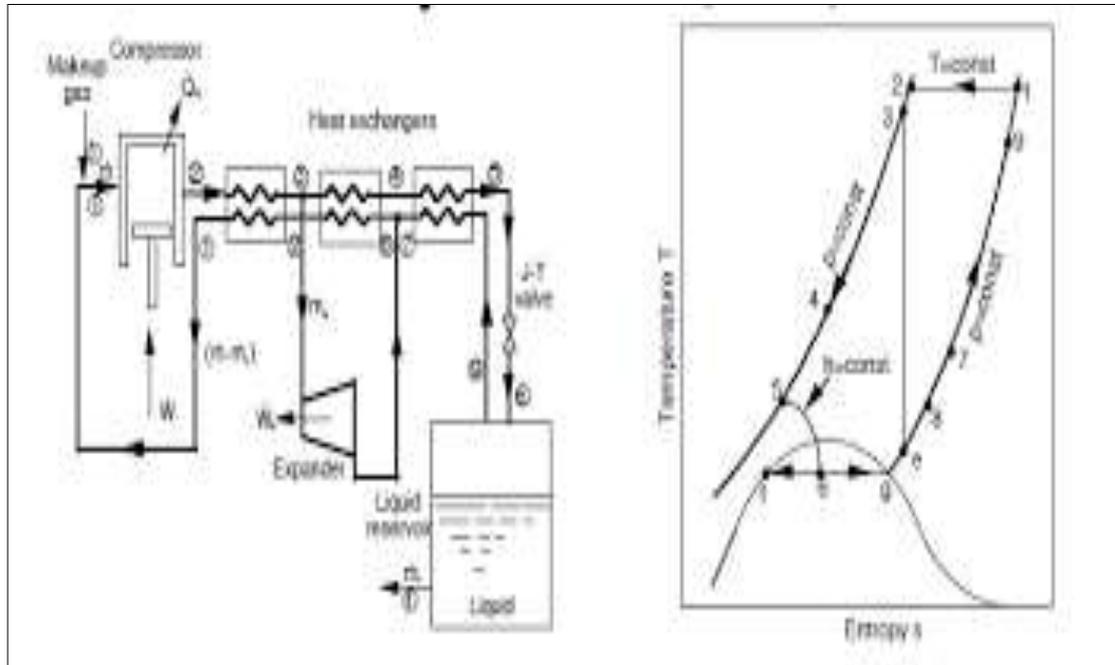


Figure II.6 : cycle de liquéfaction de Claude.

### II.5.6 Système de liquéfaction de Kapitza : [18]

Kapitza (1939) a modifié le système de Claude en éliminant troisième Échangeur de chaleur ou échangeur de chaleur à basse température. Plusieurs modifications pratiques notables ont également été introduites dans ce système à un moteur d'expansion rotatif et a lieu de mouvement alternative turbine. Le premier échangeur de chaleur ou élevé la température dans le système de Kapitza était en fait un ensemble de régénérateurs valvé, qui combine le processus de refroidissement avec le processus de purification. Le gaz entrant a été refroidi dans une unité et d'impuretés, il a été déposé tandis que le flux sortant réchauffer dans l'autre appareil et rincé les impuretés congelées déposées en elle. Kapitza en fait une analyse minutieuse des turbo-réfrigération et développer des turbines à écoulement radial pour la réfrigération de l'air.

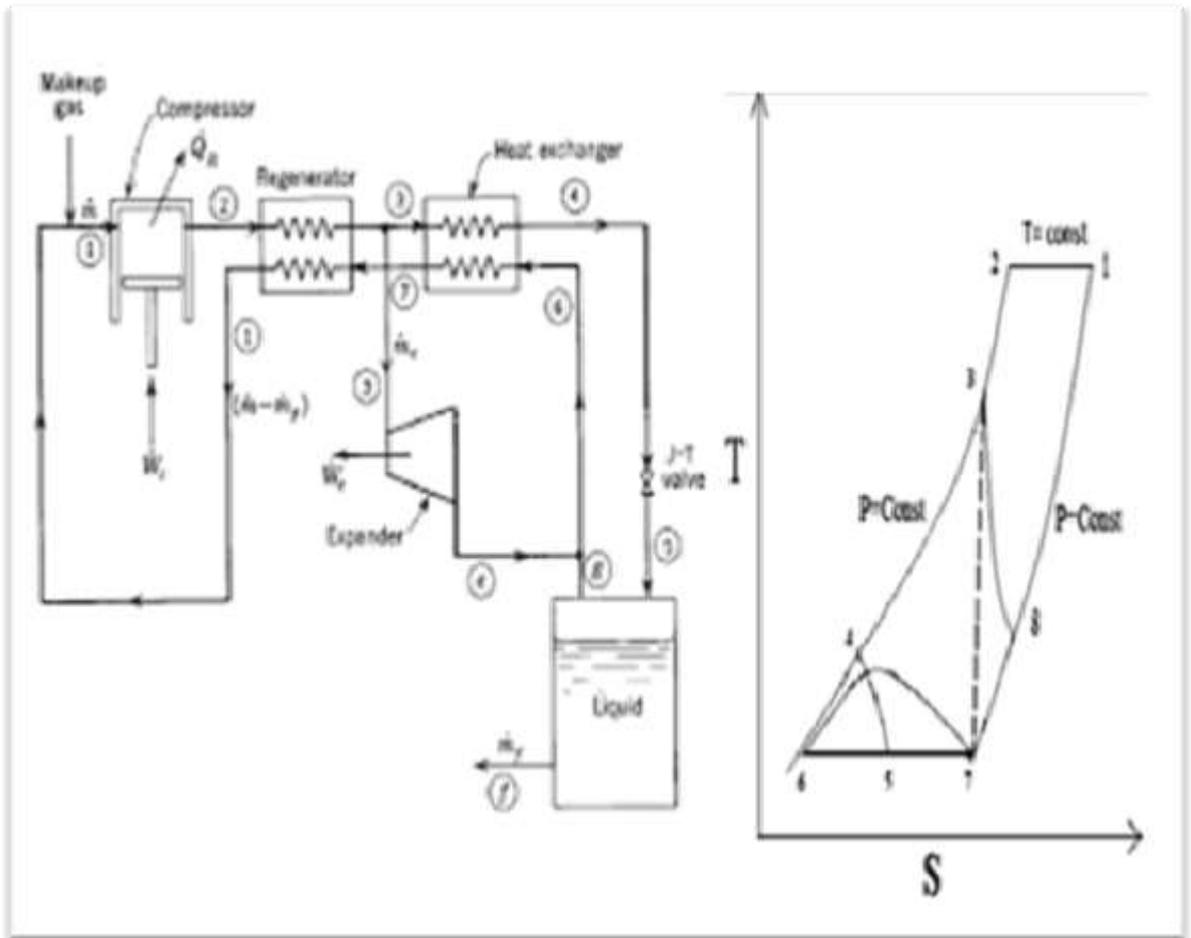


Figure II.7 : cycle de liquéfaction de Kapitza .

II.5.7 Cycle de liquéfaction de Collins (1952) : [19]

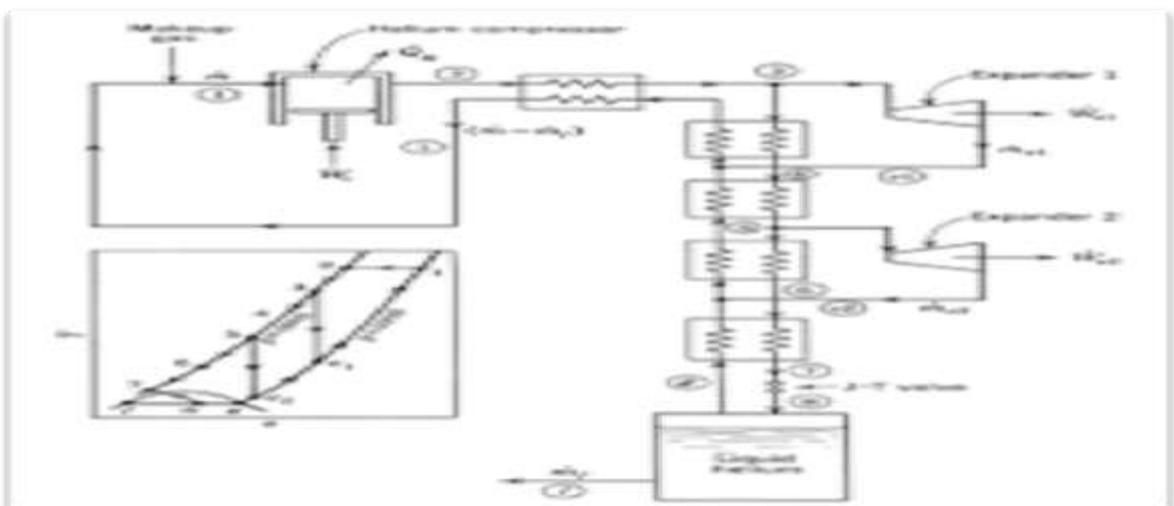


Figure II.8 : Cycle de liquéfaction de Collins (1952).

### II.5.8 Cycle en cascade classique : [20]

Le procédé consiste à réduire la pression du gaz naturel à liquéfier.

Plusieurs réfrigérants sont mis en cascade à des niveaux de chaleur de plus faibles. Ce temps

Le transfert de température froide se produit lorsque la température se déplace progressivement d'un étage à l'autre réduire. Les principes physiques utilisés lors des changements d'état +des fluides sont basés sur concernant l'enthalpie de vaporisation ou de condensation à la température selon la nature fluide et sa pression. Parmi les réfrigérants couramment utilisés, nous différenciation : propane, éthylène, méthane, etc.

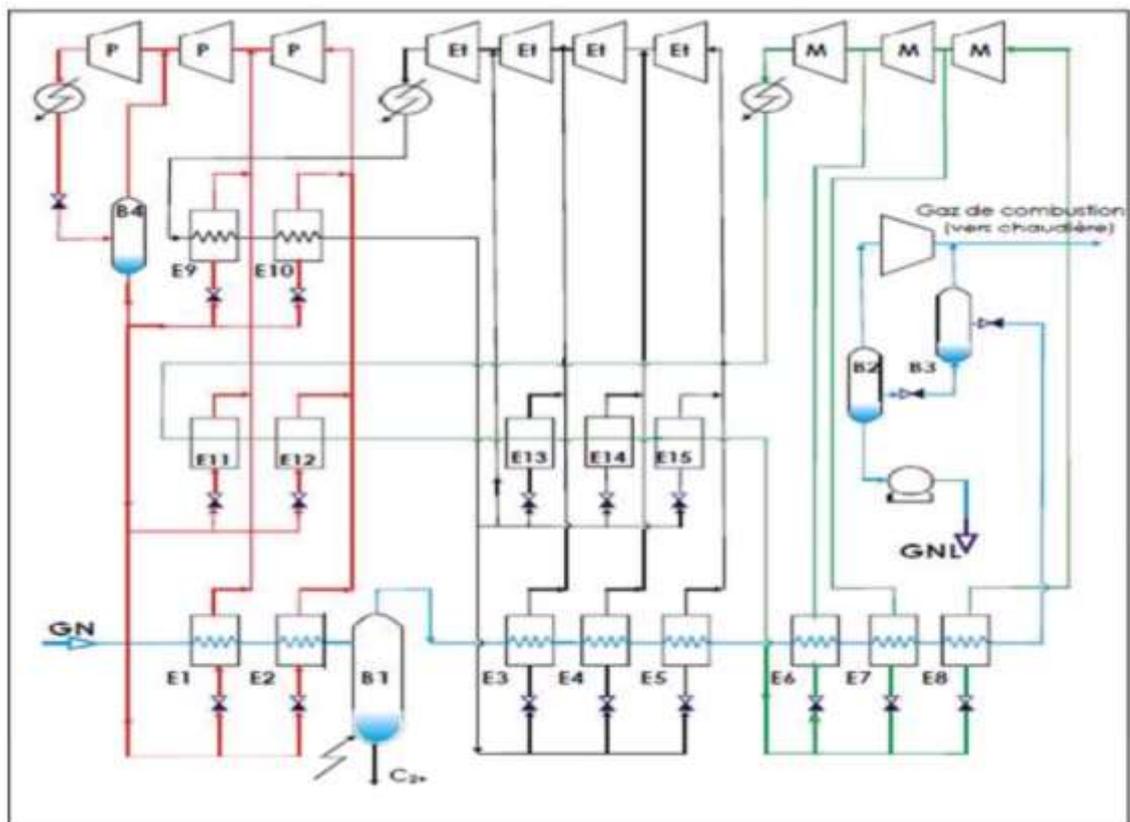


Figure II.9 : cycle en cascade classique.

## **II.6 Généralité sur l'air :**

### **II.6.1 Composition de l'air :**

L'air que nous respirons est un mélange des gazeux composé de 78% d'azote 21% oxygène et 0.93% argon et 0.1 restants comprennent principalement dioxyde carbone hydrogène et gaz nobles donc 0.93% d'air est un mélange dz d'oxygène et l'azote.la teneur de ces deux composants principaux dans l'air à peu près le même sur toute la surface de l'air .cela s'applique a également aux gaz rares avec des quantité des variables d'hydrocarbures, d'hydrogène et de dioxyde de carbone dans certaines limites la teneur en vapeur d'eau de l'air varie fortement selon conditions météorologiques et conditions locales.

Ces ingrédients peuvent obtenu par liquéfaction de l'air et distillation fractionnée.

L'organisation de l'aviation civile internationale (oaci) définit l'air sec comme la base suivante :

- a. L'air est considéré comme un gaz parfait.
- b. L'humidité est négligeable.
- c. Les Constans physiques Sant les suivantes :
  - Masse molaire :28.9644 kg/k mol.
  - Pression atmosphérique au niveau de la mer :101325 Pa.
  - Température de surface de la mer :15 C°.
  - Constants universelle des gaz parfaits : 8314.32 j/k. k mol.
  - Densité au niveau de la mer : 1225 kg/m.

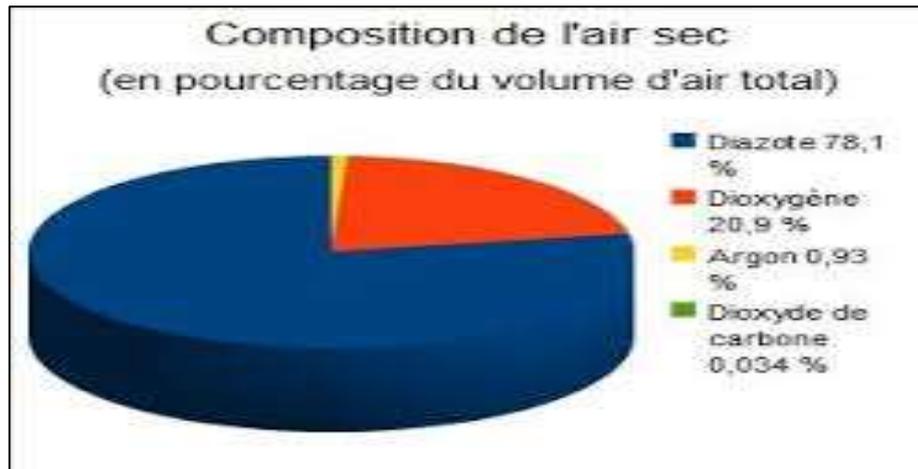


Figure II.10 : Composition de l'air. [21]

### II.6.2 Point d'ébullition des composants de l'air : [22]

O sait Que l'air contient essentiellement de l'oxygène (O<sub>2</sub>) et de l'azote (N<sub>2</sub>) et parmi les méthodes de séparation : la distillation qui s'est basé essentiellement sur le point d'ébullition.

Point d'ébullition : c'est lorsqu'un mélange liquide ou un liquide pur est chauffé progressivement.

Cette zone de pression fixe la température pour permettre de s'élever la première bulle de vapeur.

Le tableau suivant représente les différentes propriétés des Cryo-fluides.

Donc :

- La température d'ébullition de l'oxygène c'est : -183°C (90°K)
- La température d'ébullition de l'argon c'est : -186°C(87°K)
- La température d'ébullition de l'azote : -196°C(77°K)

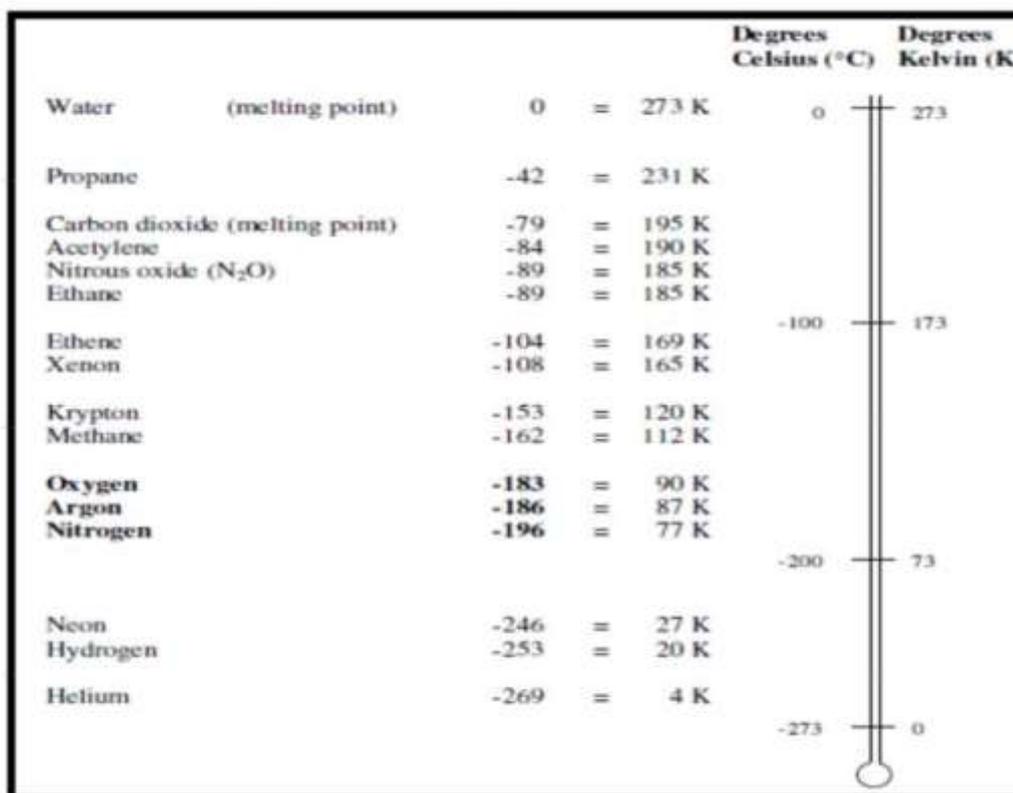


Figure II.11 : Point d'ébullition des composants de l'air. [22]

Tableau II. 1 : Table de propriété des Cryo- fluides. [23]

| Propriétés de quelques fluides   |                          | He3  | He4  | H2    | D2    | Ne    | N2     | O2     | Ar     | CH4    | H2O    |
|--|--------------------------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Température d'ébullition à p normale (1.013.10 <sup>5</sup> Pa) (k) -Teb |                          | 3.2  | 4.2  | 20.4  | 23.6  | 27.1  | 77.3   | 90.2   | 87.3   | 111.7  | 373.15 |
| POINT TRIPLE   | Tt en k                  | -    | -    | 13.95 | 18.70 | 24.50 | 63.14  | 54.40  | 84.00  | 90.70  | 273.15 |
|  | Pt en hPa                | -    | -    | 72    | 170   | 424   | 125    | 2      | 670    | 116    | 6      |
| POINT CRITIQUE   | Te en k                  | 3.33 | 5.20 | 33.20 | 38.30 | 44.40 | 126.10 | 154.40 | 150.80 | 191.00 | 647.14 |
|  | Pe en 10 <sup>5</sup> Pa | 1.16 | 2.23 | 12.80 | 16.50 | 26.60 | 33.10  | 49.50  | 47.70  | 45.80  | 220.60 |
| Volume de gaz Provenant de l'évaporation d' 1 litre de liquide           | à Té et p normale (l)    | 2.5  | 7.3  | 54.6  | 70.0  | 127.0 | 180.0  | 260.0  | 240.0  | 250.0  |        |
|  | à T et p normale (l)     | 455  | 700  | 790   | 900   | 1355  | 646    | 798    | 784    | 595    |        |
| Chaleur latente L de vaporisation à Té et p normale (kj/kg)              |                          | 8.2  | 21   | 452   | 305   | 86    | 199    | 213    | 157    | 510    | 2250   |
| Enthalpie sensinle entre Té et 300k (kj/kg)                              |                          | 2080 | 1550 | 3800  | 2048  | 280   | 233    | 193    | 112    | 402    |        |

|  |             |            |            |             |           |           |           |           |           |                          |
|--|-------------|------------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|
| Taux d'évaporation (wh/l)<br>= nombre de watts à déposer pour vaporiser 1 litre en 1 heure | <b>0.14</b> | <b>0.7</b> | <b>9.0</b> | <b>13.6</b> | <b>29</b> | <b>45</b> | <b>68</b> | <b>61</b> | <b>60</b> | <b>624</b>               |
| Capacité calorifique à pression constant (kj/kgk) à 0°C et 1 bar                           | -           | 5.20       | 14.05      | -           | 1.03      | 1.038     | 0.909     | 0.52      | 2.19      | <b>1.842</b><br>à(100°C) |
| Conductibilité thermique du gaz à Téb (mW/mk)  | -           | 10         | 15         | <40         | 8         | 7.6       | 9         | 8         | 8.7       | 22                       |
| Conductibilité thermique du gaz à p normale et 300K (mW/mk)                                | -           | 152        | 181        | 137         | 50        | 26        | 27        | 18        | 31        |                          |
| Masse volumique du liquide à p normale (kg/m <sup>3</sup> )                                | 59          | 125        | 71         | 161         | 1210      | 810       | 1140      | 1400      | 425       | 998                      |
| Masse volumique de la vapeur saturante à p normale (kg/m <sup>3</sup> )                    | 24          | 17         | 1.3        | 2.3         | 9.5       | 4.5       | 4.4       | 5.8       | 1.7       | 0.77                     |
| Masse volumique du gaz à p et T normale (kg/m <sup>3</sup> )                               | 0.13        | 0.18       | 0.09       | 0.18        | 0.9       | 1.25      | 1.43      | 1.8       | 0.55      |                          |
| Viscosité du liquide à Téb (μPa.s)   | 2           | 3.6        | 13         | 16.2        | 125       | 160       | 190       | 260       | 120       | 278                      |
| Viscosité du gaz à Téb (μPa.s)   | 1.2         | 1          | 1          | 1.5         | 4.5       | 5         | 7         | 8         | 4.4       | 12.5                     |
| Viscosité du gaz à Tambiante (μPa.s)   | -           | 20         | 9          | 13          | 30        | 17        | 20        | 22        | 11        | 19                       |
| Permittivité du liquide  | -           | 1.05       | 1.23       | 1.27        | 1.19      | 1.44      | 1.48      | 1.54      | 1.68      | 80                       |

## **II.7 Propriétés de l'oxygène, de l'azote et de l'argon :**

### **II.7.1 Propriétés de l'oxygène : [24]**

L'oxygène est gaze dans les conditions ordinaires (15°Ce 1bar), il est indispensable à la vie, il est incolore, inodore et insipide

Température à la pression atmosphérique liquide bleu clair en dessous de -183°C .la formule chimique O2 a le numéro atomique Z=8 et la masse molaire est de 31,9987 g/mol. Point d'ébullition : -183°C point de congélation : -219°C.l'oxygène est très réactif : il se combine avec presque tous les autres éléments, il intervient la plupart des processus de combustion et de corrosion.

#### **II.7.1.1 Principale application : [25]**

Gaz respiratoire en médecine, soudage, découpe, chauffage et brasage, diverses applications de laboratoire, traitement de l'eau, technologie alimentaire etc.

## **II.7.2 Propriété de l'azote :**

L'azote est gaze dans les condition ordinaires (15°C1bar) l'azote est un gaz incolore, inodore et insipide. C'est le principal composant de l'air (78.08% en volume) pression atmosphérique, température -196°C ; c'est un liquide incolore, un peu plus léger que l'eau. L'azote ne provoque pas de respiration ni de combustion (gaz inerte), mais il les éléments comme la matière sont essentiels. C'est un gaz inflammable, l'azote est livré gaz sous pression en bouteilles ou liquides eux-mêmes cryogéniques pression de vapeur saturante.

- Formule chimique N<sub>2</sub>
- Numéro atomique Z=7
- Masse molaire : 28,0134g
- Point d'ébullition : -196°C
- Point de congélation : -210°C

### **II.7.2.1 Principale application : [25]**

Gaz de protection (soudage / découpe / brasage), gaz laser, inertage, technique de mesure, agent extincteur gazeux, technologie alimentaire etc.

## **II.7.3 Propriétés de l'argon :**

L'argon est élément chimique de numéro atomique 18, symbole Ar. Il appartient à un groupe de gaz nobles (également appelés gaz nobles) comprenant l'hélium, le néon, le krypton, le xénon, le radon récemment découvert peut également faire partie de ce groupe.

Malgré le nom génétique de la famille, l'argon (sur terre) n'est pas à proprement parler gaz noble : c'est le troisième gaz le plus important après le diazote et le dioxygène composition de l'atmosphère terrestre (0.933 % en volume). Donc c'est un gaz la noblesse la plus couramment utilisée.

### **II.7.3.1 Principale Application : [25]**

Gaz de protection pour le soudage, dégazage de bains de fusion, gaz de remplissage (lampes à incandescence / vitrages isolants), gaz d'éclairage pour lampes à décharge, milieu laser dans les lasers à argon, technologie gazeux, agent alimentaire etc.

**CHAPITRE III : GENERALITE  
SUR LA PRODUCTION  
D'OXYGENE PAR CRYOGENIE**

### **III.1 Introduction :**

L'accès à l'oxygène liquide Cela demande beaucoup de techniques dans ce chapitre nous verrons comment accéder à l'oxygène liquide en séparant les gaz de l'air, depuis sa pression en passant par sa liquéfaction jusqu'à l'étape de la distillation.

### **III.2 Définition de l'oxygène :**

Troisième élément le plus fréquent dans l'univers, l'oxygène est l'une des pierres angulaires du vivant et forme des composés avec presque tous les autres éléments. [26]

#### **III.2.1 Généralité : [27]**

- Symbole :  $O_2$
- Numéro atomique : 8
- Masse atomique : 15,999 4
- Température de fusion :  $- 218,4$  °C
- Température d'ébullition :  $- 182,96$  °C
- Densité : 1,105

#### **III.2.2 Historique de l'oxygène :**

L'oxygène a été découvert indépendamment par Scheele en 1772 et Priestley en 1774. Son nom lui a été donné par Lavoisier en 1777, à partir du grec « oxus », « acide ». [26]

#### **III.2.3 Propriétés de l'oxygène :**

Dans les conditions normales de température et de pression, l'oxygène est un gaz inodore et incolore. C'est également le plus paramagnétique Des gaz. L'oxygène liquide, quant à lui, est également paramagnétique.

L'oxygène est un élément capital pour le vivant car il est au centre de la respiration De nombreux êtres vivants. Il participe également aux processus de combustion. L'oxygène est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre Et un cinquième de l'atmosphère Terrestre est composé d'oxygène sous forme de gaz diatomique,  $O_2$ , mais aussi, à l'état de traces, sous forme d'ozone  $O_3$ . [26]

### **III.3 Oxygène liquide : [28]**

L'oxygène est le deuxième plus grand composant de l'atmosphère, comprenant 20,8% en volume. L'oxygène liquide est bleu pâle et extrêmement froid. Bien qu'ininflammable, l'oxygène est un oxydant puissant. L'oxygène est nécessaire pour soutenir la vie.

L'oxygène réagit avec presque tous les matériaux organiques et les métaux, formant généralement un oxyde. Les matériaux qui brûlent dans l'air brûleront plus vigoureusement dans l'oxygène. L'équipement utilisé dans le service d'oxygène doit répondre à des exigences de nettoyage strictes et les systèmes doivent être construits avec des matériaux qui ont des températures d'inflammation élevées et qui ne réagissent pas avec l'oxygène dans les conditions de service. Les cuves doivent être fabriquées selon les codes de société américaine de génie mécanique ASME et conçues pour résister aux températures et pressions du procédé.

L'oxygène liquide est un liquide cryogénique. Les liquides cryogéniques sont des gaz liquéfiés dont le point d'ébullition normal est inférieur à  $-130\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). L'oxygène liquide a un point d'ébullition de  $-297\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Étant donné que la différence de température entre le produit et l'environnement environnant est importante, même en hiver, il est essentiel de maintenir l'oxygène liquide isolé de la chaleur environnante. Le produit nécessite également un équipement spécial pour la manipulation et le stockage.

L'oxygène est souvent stocké sous forme liquide, bien qu'il soit principalement utilisé sous forme de gaz. Le stockage liquide est moins encombrant et moins coûteux que la capacité équivalente du stockage gazeux à haute pression. Un système de stockage typique se compose d'un réservoir de stockage cryogénique, d'un ou plusieurs vaporisateurs et d'un système de contrôle de la pression. Le réservoir cryogénique est construit, en principe, comme une bouteille à vide. Il y a un vaisseau intérieur entouré d'un vaisseau extérieur. Entre les vaisseaux se trouve un espace annulaire qui contient un milieu isolant dont tout l'air a été éliminé. Cet espace éloigne la chaleur de l'oxygène liquide contenu dans le récipient intérieur. Les vaporisateurs transforment l'oxygène liquide en un état gazeux. Un collecteur de contrôle de la pression contrôle ensuite la pression du gaz qui alimente le processus ou l'application.

Les navires utilisés dans le service d'oxygène liquide doivent être conçus conformément à ASME.

### **III.3.1. Fabrication :**

L'oxygène est produit par une unité de séparation d'air (ASU) par liquéfaction de l'air atmosphérique et séparation de l'oxygène par distillation cryogénique continue. L'oxygène est ensuite éliminé et stocké sous forme de liquide cryogénique. L'oxygène peut également être produit de manière non cryogénique en utilisant des processus d'adsorption sélective pour produire un produit gazeux.

Le processus de fabrication de l'ASU commence par un compresseur d'air principal et se termine à la sortie des réservoirs de stockage du produit. L'air est comprimé et envoyé à travers un système de nettoyage où l'humidité, le dioxyde de carbone et les hydrocarbures sont éliminés. L'air passe ensuite dans des échangeurs de chaleur où il est refroidi à température cryogénique. Ensuite, l'air entre dans une colonne de distillation à haute pression où il est physiquement séparé en une forme vapeur d'azote en haut de la colonne et une forme liquide d'oxygène « brut » (~ 90 % O<sub>2</sub>) en bas.

Cet oxygène liquide brut est soutiré de la colonne et envoyé dans une colonne basse pression, où il est distillé jusqu'à ce qu'il réponde aux spécifications commerciales. L'oxygène liquide est envoyé dans un réservoir de stockage cryogénique.

### **III.3.2 Utilisations :**

L'oxygène est généralement liquéfié pour qu'il peut être transporté et stocké plus efficacement en grands volumes. Cependant, la plupart des applications utilisent de l'oxygène après sa vaporisation sous forme gazeuse. Les principales utilisations de l'oxygène sont liées à ses fortes propriétés oxydantes et vitales.

L'oxygène est couramment utilisé dans les applications médicales et de santé. L'oxygène liquide est utilisé comme oxydant pour les carburants liquides dans les systèmes propulsifs des missiles et des fusées. L'oxygène est largement utilisé dans les industries métallurgiques en conjonction avec l'acétylène et d'autres gaz combustibles pour la coupe, le soudage, le décapage, le durcissement, le nettoyage et la fusion des métaux. Les fabricants d'acier et de fer utilisent également beaucoup d'oxygène ou d'air enrichi en oxygène pour effectuer le raffinage chimique et le chauffage associés à l'élimination du carbone et à d'autres réactions d'oxydation. Des avantages tels que des économies de carburant et d'énergie ainsi

que des volumes d'émission totaux plus faibles sont souvent obtenus lorsque l'air est enrichi ou remplacé par de l'oxygène de plus grande pureté.

Dans les industries chimiques et pétrolières, l'oxygène est utilisé comme composant d'alimentation pour réagir avec des blocs de construction d'hydrocarbures pour produire des produits chimiques tels que des alcools et des aldéhydes. Dans de nombreux procédés, l'oxygène pour la réaction peut être obtenu à partir de l'utilisation d'air. Cependant, l'utilisation directe d'oxygène, ou l'enrichissement de l'air en oxygène, est nécessaire pour certains procédés. Plusieurs intermédiaires pétrochimiques majeurs sont actuellement fabriqués avec de l'oxygène de haute pureté, notamment l'oxyde d'éthylène et de propylène (antigel), le chlorure de vinyle (pour le PVC) et le caprolactame (pour le nylon).

L'industrie des pâtes et papiers utilise l'oxygène comme agent de blanchiment et oxydant. Une variété de flux de processus (liqueur) présentent des propriétés physiques améliorées après traitement avec de l'oxygène; les coûts d'exploitation des usines s'améliorent également.

De même, l'oxygène améliore le processus de combustion dans les industries qui fabriquent du verre, de l'aluminium, du cuivre, de l'or, du plomb et du ciment, ou qui sont impliquées dans l'incinération ou la dépollution des déchets. Il y a des avantages correspondants en matière de productivité, d'énergie, de maintenance et d'émissions que les utilisateurs finaux peuvent réaliser.

Les usines de traitement des eaux usées utilisent avec succès l'oxygène pour améliorer l'efficacité de leur processus chimique. Les aquaculteurs tels que les pisciculteurs voient également des avantages dans la santé ou la taille de leur bétail lorsque l'environnement hôte est oxygéné.

### **III.3.3 Propriétés physiques et chimiques de l'oxygène liquide :**

**Tableau III. 1 : Propriétés physiques et chimiques de l'oxygène liquide.**

|                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| Formule moléculaire        | O <sub>2</sub>        |
| Poids moléculaire          | 31.999                |
| Point d'ébullition 1 atm   | -297,4 °F (-183,0 °C) |
| Point de congélation 1 atm | -361,9 °F (-218,8 °C) |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Température critique                                       | -181,8 °F (-118,4 °C) |
| Pression critique  | 729,1 psia (49,6 atm) |
| Densité, liquide BP, 1 atm                                 | 71,23 lb/scf          |
| Densité, Gaz 68°F (20°C), 1 atm                            | 0.0831 lb/scf         |
| Gravité spécifique, Gaz (air=1) 68°F (20°C), 1 atm         | 1.11                  |
| Gravité spécifique, liquide (eau = 1) 68 °F (20 °C), 1 atm | 1,14                  |
| Volume spécifique à 68 °F (20 °C),1 atm                    | 12,08 scf/lb          |
| Chaleur latente de vaporisation                            | 2 934 Btu/lb mole     |
| Taux d'expansion, liquide à gaz, BP 68 °F (20 °C)          | 1 à 860               |
| Solubilité dans l'eau 77 °F (25 °C), 1 atm                 | 3,16 % en volume      |

### III.3.4 Expédition d'oxygène liquide

Toutes les expéditions d'oxygène liquide doivent être conformes aux réglementations DOT. Cela s'applique aux expéditions de fret automobile, ferroviaire, aérien et maritime. Pour les expéditions par voie aérienne, tous les colis doivent également être conformes aux réglementations sur les marchandises dangereuses de l'Association du transport aérien international/Organisation aérienne civile internationale (IATA/OACI): les expéditions par bateau doivent également être préparées conformément aux réglementations de l'Organisation maritime internationale (OMI). Tous les emballages utilisés pour le transport de l'oxygène doivent être soit « UN/DOT Spécification » ou « UN/DOT Autorisé » et en bon état pour le transport.

Les conteneurs utilisés pour le transport d'oxygène liquide à une pression inférieure à 25 psig (40 psia) sont UN/DOT Conteneurs autorisés. Il s'agit de conteneurs construits selon des spécifications autres que celles du DOT, mais autorisés par le DOT pour être utilisés dans le transport de produits approuvés. Les conteneurs utilisés pour le transport d'oxygène liquide à des pressions supérieures à 25 psig (40 psia) doivent être conçus, fabriqués et testés conformément aux spécifications du DOT. DOT Code de Fédéral Régulations, Titre 49 spécifie ces exigences d'étiquetage et d'identification :

- **Classe de danger DOT** : 2.2
- **Étiquette d'expédition DOT** : Gaz et oxydant ininflammables (Pour les expéditions nationales, seule l'étiquette d'oxygène peut être utilisée)
- **Numéro d'identification** : UN1073 Nom d'expédition DOT : Oxygène, Placard liquide

- **Réfrigéré** : Gaz ininflammable.

### **III.3.5 Stockage :**

L'oxygène liquide est stocké, expédié et manipulé dans plusieurs types de conteneurs, selon la quantité requise par l'utilisateur. Les types de conteneurs utilisés comprennent le Dewar, le cylindre de liquide cryogénique et le réservoir de stockage cryogénique. Les quantités de stockage varient de quelques litres à plusieurs milliers de gallons. Étant donné que la fuite de chaleur est toujours présente, la vaporisation a lieu en continu. Les taux de vaporisation varient en fonction de la conception du conteneur et du volume de produit stocké.

Les conteneurs sont conçus et fabriqués selon les codes et spécifications applicables aux températures et pressions concernées.

### **III.3.6 Considérations de sécurité :**

Les dangers associés à l'oxygène liquide sont l'exposition à des températures froides qui peuvent provoquer de graves brûlures ; surpression due à l'expansion de petites quantités de liquide dans de grands volumes de gaz dans un équipement mal ventilé ; enrichissement en oxygène de l'atmosphère environnante; et la possibilité d'une réaction de combustion si l'oxygène est autorisé à entrer en contact avec un matériau non compatible.

La basse température de l'oxygène liquide et les vapeurs qu'il dégage non seulement présentent un grave risque de brûlure pour les tissus humains, mais peuvent également faire perdre de leur résistance à de nombreux matériaux de construction et les rendre suffisamment cassants pour se briser.

Il est important de noter que la chimie du feu commence à changer lorsque la concentration d'oxygène augmente. Les matériaux qui s'enflamment facilement dans l'air deviennent non seulement plus sensibles à l'inflammation, mais brûlent également avec une violence accrue en présence d'oxygène. Ces matériaux comprennent les vêtements et les cheveux, qui ont des espaces d'air qui emprisonnent facilement l'oxygène. Des niveaux élevés d'oxygène peuvent être atteints très rapidement et tout le personnel doit être conscient du danger.

Tout vêtement qui a été éclaboussé ou imbibé d'oxygène liquide ou exposé à de fortes concentrations d'oxygène doit être retiré immédiatement et aéré pendant au moins une heure. Le personnel doit rester dans une zone bien ventilée et éviter toute source d'inflammation jusqu'à ce que ses vêtements soient complètement exempts de tout excès d'oxygène. Les vêtements saturés d'oxygène sont facilement inflammables et brûlent vigoureusement.

Ne pas autoriser le tabagisme ou les flammes nues dans les zones où l'oxygène liquide est stocké ou manipulé. Ne laissez pas l'oxygène liquide ou l'air enrichi en oxygène entrer en contact avec des matières organiques ou des substances inflammables ou combustibles de toute nature. Certains des matériaux organiques qui peuvent réagir violemment avec l'oxygène lorsqu'ils sont enflammés par une étincelle ou même un choc mécanique sont l'huile, la graisse, l'asphalte, le kérosène, le tissu, le goudron et la saleté qui peut contenir de l'huile ou de la graisse. En cas de déversement d'oxygène liquide sur de l'asphalte ou d'autres surfaces contaminées par des combustibles, ne pas marcher ou faire rouler l'équipement sur la zone du déversement. Éloignez les sources d'ignition pendant 30 minutes après la disparition de tout givre ou brouillard.

Les systèmes utilisés en service d'oxygène doivent répondre à des exigences de nettoyage strictes pour éliminer tout contaminant incompatible. La brochure G-4.1 de la CGA, « Nettoyage de l'équipement pour le service d'oxygène », décrit les méthodes de nettoyage des équipements utilisés dans le service d'oxygène. La brochure O2-DIR de CGA, « Annuaire des agents de nettoyage pour Oxygène Service », fournit des informations comparatives sur les agents de nettoyage utilisés pour nettoyer les équipements à oxygène.

Consultez également la fiche de données de sécurité (FDS) et suivez toutes les recommandations.

### **III.3.7 l'oxygène liquide médical :**

L'oxygène liquide médical est un gaz d'inhalation (un gaz qui est inspiré). Il est incolore, inodore et insipide. Il est fourni sous forme de gaz liquide (à très basse température) dans une cuve cryogénique.

L'oxygène est essentiel à la vie. L'oxygène inspiré avec l'air pénètre dans vos poumons où il est aspiré dans votre sang. Le sang transporte l'oxygène vers tous les tissus de

vos tissus. Les tissus prélèvent l'oxygène du sang afin qu'ils puissent fonctionner correctement.

Si, pour une raison quelconque, vous n'obtenez pas assez d'oxygène dans votre sang à partir de vos poumons, on peut vous prescrire de l'Oxygène Liquide Médical pour respirer afin d'augmenter le niveau d'oxygène dans vos tissus corporels. Vous pourrez respirer plus facilement.

Médical Liquide Oxygène est prescrit lorsque vous n'obtenez pas suffisamment d'oxygène dans votre corps par les poumons en raison d'une maladie ou de lésions pulmonaires ou lorsque vous avez des difficultés respiratoires.

L'Oxygène Médical Liquide peut également être prescrit/utilisé :

- Pour votre bébé s'il est né prématurément ou s'il a des problèmes respiratoires.
- Dans le traitement des céphalées en grappe et d'autres conditions où l'approvisionnement en sang localisé est faible.
- Avec des anesthésiques pendant la chirurgie et pour la ventilation artificielle en soins intensifs après une chirurgie ou suite à un accident.
- Comme propulseur pour inhaler d'autres médicaments dans le cadre d'un traitement par nébulisation.
- Dans les chambres de pression pour réduire le risque de dommages dus aux bulles de gaz dans les vaisseaux sanguins ou s'il y a du gaz emprisonné dans les espaces corporels. Lorsque la capacité de transport d'oxygène du sang est réduite, comme dans le cas d'un empoisonnement grave au monoxyde de carbone. Il peut également être utilisé dans le cadre du traitement de la gangrène gazeuse (dommages aux tissus mous causés par une infection bactérienne). [29]

### **III.3.8 La différence entre l'oxygène médical et l'oxygène industriel :**

**Oxygène industriel :** fait référence à l'oxygène utilisé dans l'industrie, nécessite généralement une pureté contenant de l'oxygène, d'autres n'ont aucune exigence, principalement utilisé pour le soudage, le soudage au gaz, la découpe au gaz, etc. Dans le même temps, l'oxygène industriel contient également des gaz nocifs tels que le monoxyde de carbone et le méthane. L'oxygène industriel est un gaz utilisé dans la production industrielle et le traitement des produits. Les exigences de faible qualité nécessitent généralement une pureté

de 99% ou plus pour être qualifiées. Pendant le processus de compression et de remplissage, de l'eau de lubrification acide ou alcaline est introduite dans le cylindre, ce qui provoquera la rouille de la paroi intérieure du cylindre, ce qui provoquera une odeur du gaz dans le cylindre.

**L'oxygène médical:** fait référence à l'utilisation de la séparation cryogénique pour séparer l'oxygène de l'atmosphère pour fournir de l'oxygène pour le traitement médical des patients. Applicable au traitement adjuvant des maladies respiratoires causées par l'hypoxie (telles que l'asthme, la bronchite, les maladies cardiaques pulmonaires, etc.), et les maladies du cœur et du système cérébrovasculaire (telles que les maladies coronariennes, l'infarctus du myocarde, les hémorragies cérébrales, les infarctus cérébraux) pour soulager leur carence Symptômes d'oxygène; Il peut également être utilisé pour la libération rapide de la fatigue après l'inhalation d'oxygène ou un travail mental et physique intense. Par conséquent, le département national de réglementation des médicaments a toujours inclus l'oxygène médical comme médicament pour la gestion et nécessite une licence pour produire et exploiter l'oxygène médical. [40]

#### **III.4 Les Technologies de séparation de l'air : [31]**

L'air est séparé pour la production d'oxygène, d'azote, d'argon et de certains Cas particuliers pour la distillation cryogénique d'autres gaz nobles (krypton, xénon, hélium, néon) air. Unité de séparation d'air conçue pour produire de l'oxygène et du processus de compression, de refroidissement, de liquéfaction et de distillation air.

L'un des plus grands producteurs d'installations de séparation d'air est Linde (2800 Usines de séparation cryogénique de l'air dans plus de 80 pays).

L'air peut être séparé en ses composants par distillation unitaire Spéciaux. Les usines de fractionnement ou de séparation de l'air utilisent un procédé la chaleur est appelée rectification cryogénique pour séparer différents Les composants produisent de l'azote et de l'oxygène de haute pureté les uns des autres formes liquides et gazeuses.

Les différentes technologies de séparation de l'air qui ont été développées sont :

- ✓ La séparation cryogénique
- ✓ La séparation par membrane
- ✓ La séparation par adsorption etc...

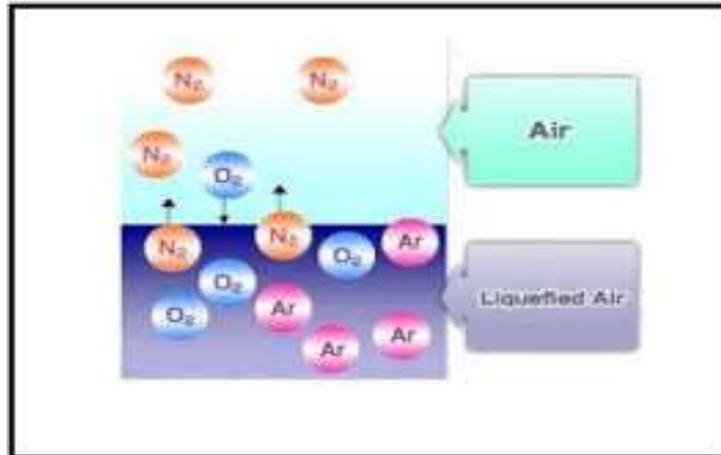


Figure III.1 : Schéma de séparation de l'air.

### III.5 Séparation cryogénique de l'air :

Le procédé de séparation cryogénique de l'air est le procédé le plus populaire. Il est le plus Utilisé dans toutes les usines et à grande échelle.

Ont des besoins différents (exigences des consommateurs, nature du produit final, etc.) Définir et exiger la sélection d'un cycle de séparation cryogénique de l'air, à savoir :

- ✓ quelle quantité de produit (si oxygène ou azote, oxygène et azote).
- ✓ La pureté souhaitée du produit.
- ✓ Pression de refoulement du produit gazeux.
- ✓ Si le produit doit être conservé sous forme liquide.
- ✓ Le plus important est le processus qui permet d'utiliser le moins d'énergie
- ✓ Avec un rendement maximal.

#### III.5.1 Les étapes de base de la séparation cryogénique de l'air : [32]

Les étapes de base de cette technologie Sant décrétés comme :

- Compression d'air : de l'air ambiant est absorbé, filtrer et comprimé approximativement à 5-6 bar un compresseur. Pré-refroidissement de l'air : dans un premier temps, l'air comprimé est pré réfrigérer avec de l'eau généralement jusqu'à une température ambiante.
- Purification d'air : des impuretés telle que la vapeur d'eau et l'anhybride carbonique sont alors enlevées de l'air par les tamis moléculaires.

- Séparation d'air : la séparation d'air dans l'oxygène pur et l'azote pur est effectuée dans deux colonnes, les colonnes à moyenne et basse pression. La différence des points d'ébullition des constituants de l'air est exploitée pour réaliser la séparation. L'oxygène devient liquide à  $-138^{\circ}\text{C}$  et l'azote à  $-196^{\circ}\text{C}$ .
- Retrait et stockage : l'oxygène et l'azote gazeux sont introduits dans des canalisations pour transport aux utilisateurs. En forme liquide, l'oxygène, l'azote sont stocké dans les réservoirs et transportés aux clients par des camions-citernes.

### III.5.2 Schéma de principe d'une séparation cryogénique de l'air :

Le procédé de la séparation de l'air comporte les opérations suivantes : [17]

- La compression
- L'épuration
- Le refroidissement
- La liquéfaction
- La distillation

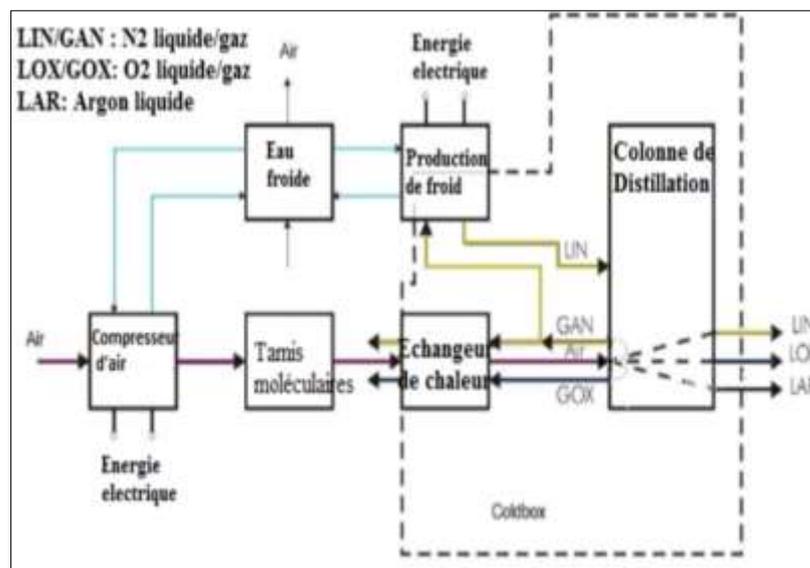


Figure III.2 : fonctionnement du processus principal d'une séparation cryogénique de l'air. [30]

**a) Aspiration et compression de l'air ambiant :**

La première étape de toute unité de séparation cryogénique de l'air est filtration et compression de l'air. C'est l'une des parties les plus importantes installé ; l'air est aspiré par un turbocompresseur avec un filtre généralement à l'ors de la compression, puisque le filtre préserve particules supérieures à 2 u, comme la poussière).

Lorsqu'il est inhalé, l'air est comprimé à environ 5-6 bars (la pression est suffisante fais-le fonctionner). Par exemple, si nous prenons environ 30 000 trafics entrants m<sup>3</sup>/h (débit mesuré à pression atmosphérique, à une température de 15°C). Ce qui donne 400 tonnes de gaz liquides (azote, oxygène et argon) sont produites par jour.

**b) Pré-refroidissement avec de l'eau froide:**

L'air comprimé filtré est pré-refroidi à température approche de la température ambiante avec un échangeur de chaleur refroidi par eau ou refroidi par air. Dans certains cas, il refroidi dans un système de réfrigération mécanique à une température d'une température beaucoup plus basse. Il en résulte une meilleure élimination des impuretés, et minimise également la consommation d'énergie, réduisant ainsi la performance d'usine des aux changements de la température atmosphérique de façon saisonnière.

**c) L'épuration de l'air:**

L'air ambiant contient d'autres polluants (humidité, dioxyde de carbone, hydrocarbures, etc.), doivent toujours être éliminés pour répondre caractéristique de qualité du produit. Par conséquent, il doit être purifié ; avant que l'air attienne la section de distillation ; en piégeant le reste de ces contaminants pour éviter de la neige carbonique et des glaçons se forment pendant le refroidissement. Autre dans certaines parties, l'oxygène réagit chimiquement avec les hydrocarbures (risque d'explosion). C'est pour ces raisons qu'il y aura une deuxième étape où l'air est filtré par des tamis moléculaires rempli d'alumine et de zéolithe (purifiée par adsorption) ; pour accélérer cette opération, deux tamis fonctionnement en alternance, l'un est utilisé et l'autre est régénéré.

**d) Le refroidissement de l'air:**

La troisième étape de la séparation cryogénique de l'air est le transfert de chaleur en plus (refroidissement par air), ça se fait dans un échangeur de chaleur actuellement, dans les échangeurs de chaleur, l'air est refroidi à des températures proches du point de rosée.

Gaz de séparation froid de la colonne de distillation. Si approprié et suffisant avec un grand échangeur de chaleur, le gaz froid peut être chauffé à la température est légèrement inférieure à la température de l'air entrant, de sorte que la perte de froid devient acceptable.

Le refroidissement se fait généralement dans un échangeur de chaleur en aluminium soudage. Ils permettent un échangeur de chaleur entre l'alimentation en air entrant et le produit froid (le jet gaz résiduel quitte le processus de séparation de l'air).

Le refroidissement est réalisé par échangeur de chaleur interne, où flux d'air froid généré lors du processus de refroidissement de l'air compression. La chute rapide de pression provoque alors le refroidissement de l'air comprimé jusqu'à la température est beaucoup plus basse, donc il se liquéfie partiellement. Avoir dans de telles conditions, l'air sera prêt à être séparé dans la colonne de séparation, qui sera séparée dans la colonne de séparation la vraie chose arrivera.

**e) Distillation et séparation:**

Le gaz froid traverse l'échangeur de chaleur et est chauffé vers le haut en même temps, le liquide est introduit dans le réservoir.

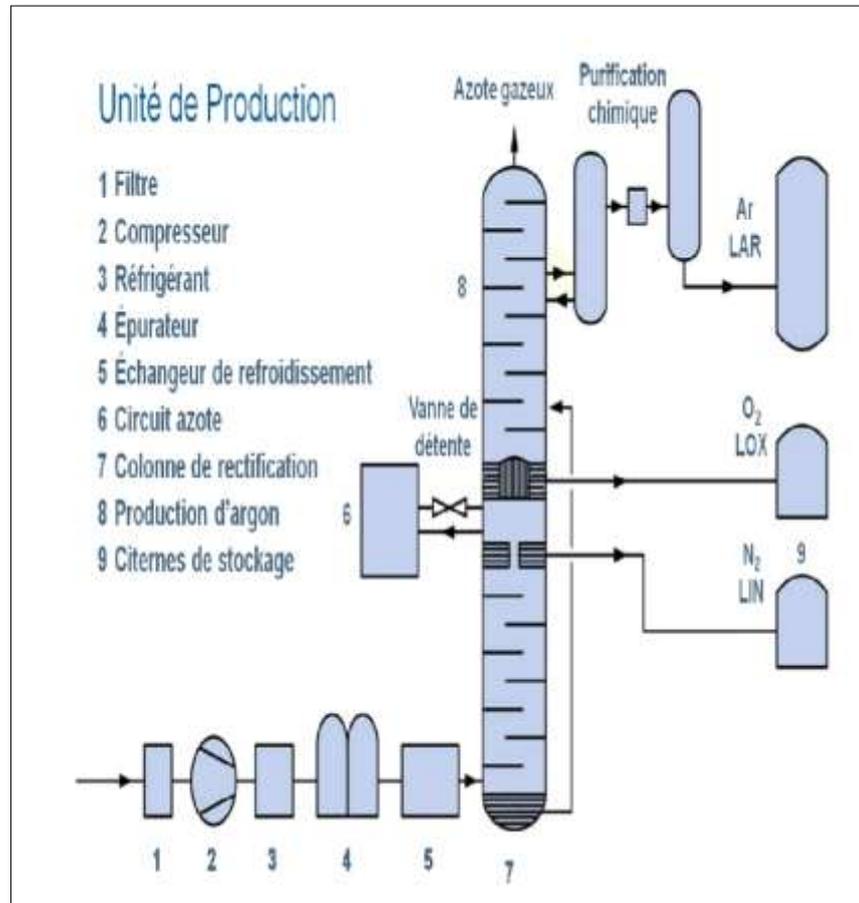
Cette étape consiste à utiliser une colonne de distillation pour séparer l'air de l'air.

Produit souhaité. Par exemple, un système de distillation d'oxygène a pressions « haute » et « basse ».

Pour réaliser la séparation, l'air doit atteindre le point de rosée ou le point de rosée.

Condensation (dans l'échangeur) due à la récupération d'énergie froide du gaz sortant colonne de distillation.

L'air devenu liquide est absorbé dans une colonne de distillation pour séparer l'azote, C'est un gaz qui se liquéfie à une pression donnée à la température la plus basse, en une colonne de distillation, où le gaz est dans des conditions qui ne lui permettent pas de rester liquide, l'azote redevient alors gazeux et remonte dans la colonne de distillation.



FigureIII.3 : Séparation des gaz de l'air. [35]

### III.6 Techniques générale utilisée pour la distillation :

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

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

**a) Colonne de distillation normale : [30]**

La configuration la plus courante d'une unité de distillation est une colonne avec les éléments suivants :

- Le rebouilleur inférieur produit des vapeurs qui apparaissent dans la colonne,
- Sortie pour produit de fond, à l'état liquide,
- Certains garnissages dans la colonne maintiennent la vapeur en contact étroit avec le liquide,
- Accès aux produits de production à un niveau moyen,
- sortie pour produit vapeur supérieur,
- des condenseurs pour la liquéfaction des vapeurs de tête,
- Revenant à la colonne de liquide supérieure, il descend et entre en contact avec la vapeur montante. Ce liquide est appelé reflux,
- Une partie du liquide de tête ou de la vapeur de tête est extraite comme produit c'est le distillat.

**b) Double colonne de Linde (sans argon) :**

Dans la plupart Des cas les usines des séparations d'air utilisent une combinaison de deux colonnes utilisées. C'était l'idée de Karl Von Linde (voir la figure).

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

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

De l'air ne peut pas être charge la forme liquide a cette colonne, car il ne contient pas un rebouilleur qui est exigé pour créer la vapeur. Nous avons déjà vu qu'au-dessus de la colonne, il y a d'azote pur car il a un point d'ébullition inférieure que l'oxygène. Le produit inférieure ne sera pas pur, toutefois compare a l'air qui a été charge, c'est des riches de

l'oxygène car l'azote a été sorti en tant que produit supérieur. Le produit inférieur, connu sous le nom de «liquide riche», contient l'oxygène approximativement de 35 40%.

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

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

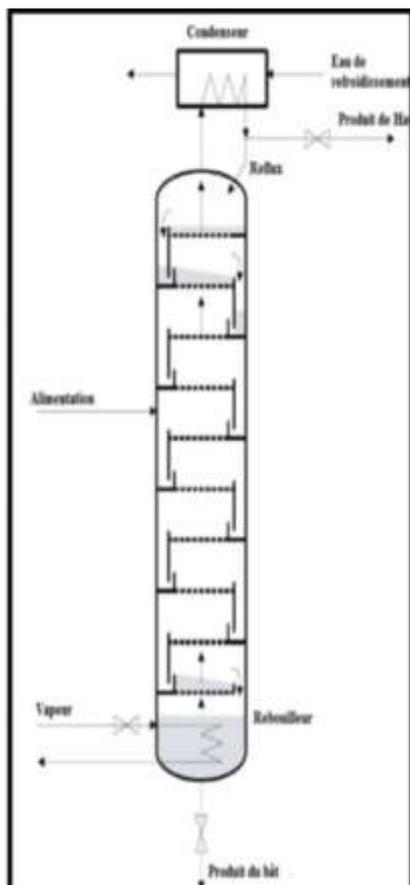


Figure III.4 .a : Une colonne de distillation Normale. [30]

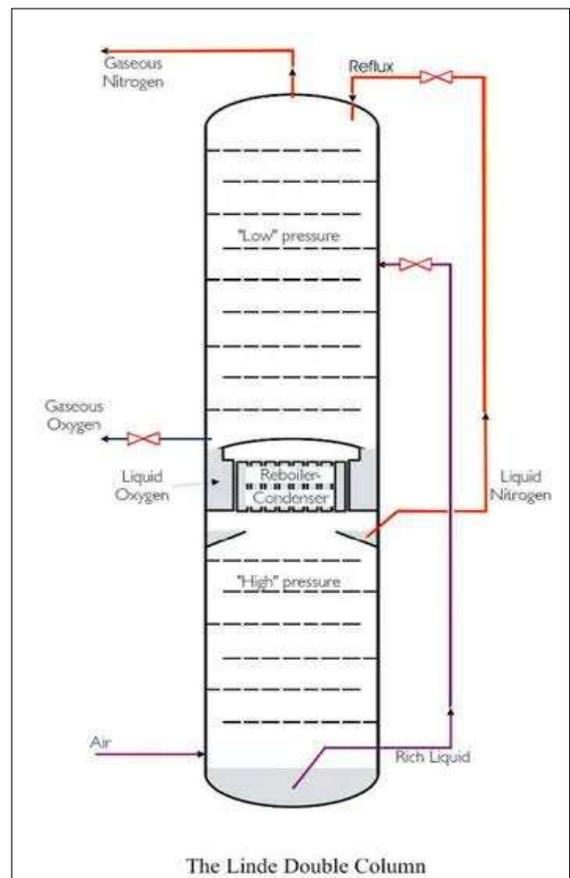


Figure III.4.b : Double colonne de Linde. [30]

### **III.7 Equipement pour la séparation cryogénique de l'air :**

#### **III.7.1 Compresseurs cryogéniques:**

Les compresseurs cryogéniques peuvent être à déplacement positif (alternatifs ou rotatifs) ou impulsivité (centrifugation) Deux contraintes strictes nous obligent à faire un bon choix type comparé à un autre.

- Le processus de compression doit être aussi isotherme que possible.
- Et il faut le faire sans polluer le gaz pour ne pas bloquer l'échangeur.

Les Compresseurs à pistons secs ; ce sont des compresseurs coûteux, pas très fiables et lubrifiés, qui a une grande fiabilité, mais contamine le gaz avec de l'huile.

Le développement de système de séparation d'huile performants a permis l'utilisation de lubrification des compresseurs à vis, où une injection importante d'huile permet d'obtenir compression isotherme. Ce type de compresseur est très fiable (jusqu'à 40 000 heures sans maintenance) en raison du faible nombre de pièces mobiles. Il est maintenant presque équipée de-tous les réfrigérateurs de conception moderne sont fortement huilés

Le compresseur à vis doit être séparé dans le système de vidange d'huile. Séparation d'huile complétez comme suit :

-une très petite quantité de vapeur d'huile est absorbée par un lit de charbon actif spécial faites tourner à température ambiante. Les filtres arrêtent les particules libérées par le charbon actif.

Pour des débits volumétriques de fluides cryogéniques importants (jusqu'à 300 l/s) on recommande les compresseurs centrifuges qui ont l'avantage de supporter les grandes vitesses (40000 à 100000 tr/min) et ne pas apporter de pollution [33].

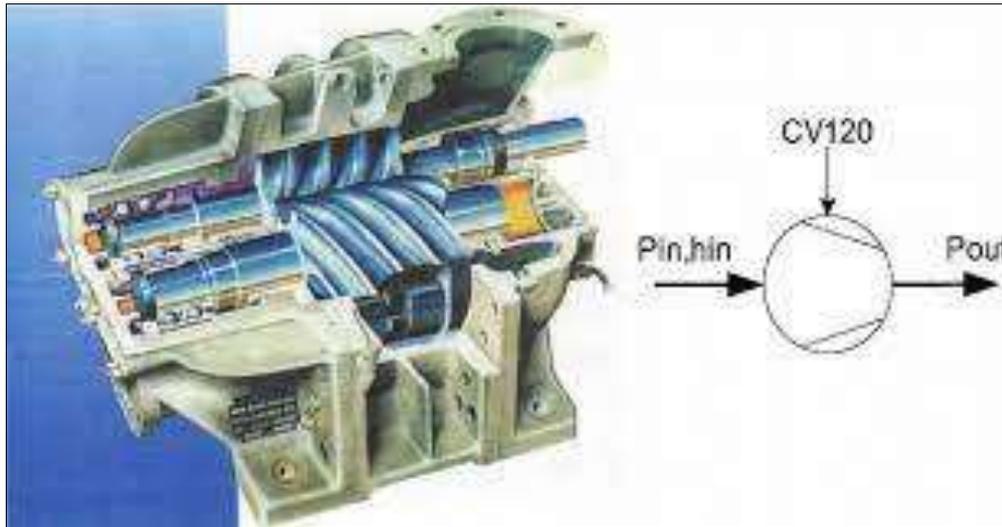


Figure III.5 : Un compresseur à vis lubrifié le schéma du modèle avec les conditions limites. [30]

### III.7.2 Les échangeurs:

Mis à part les appareils de laboratoire, dont utilisent des échangeurs bobinés, les réfrigérateurs modernes sont construits avec des échangeurs à plaques ailettes en alliage d'aluminium, qui sont compacts et efficaces [18] [33]

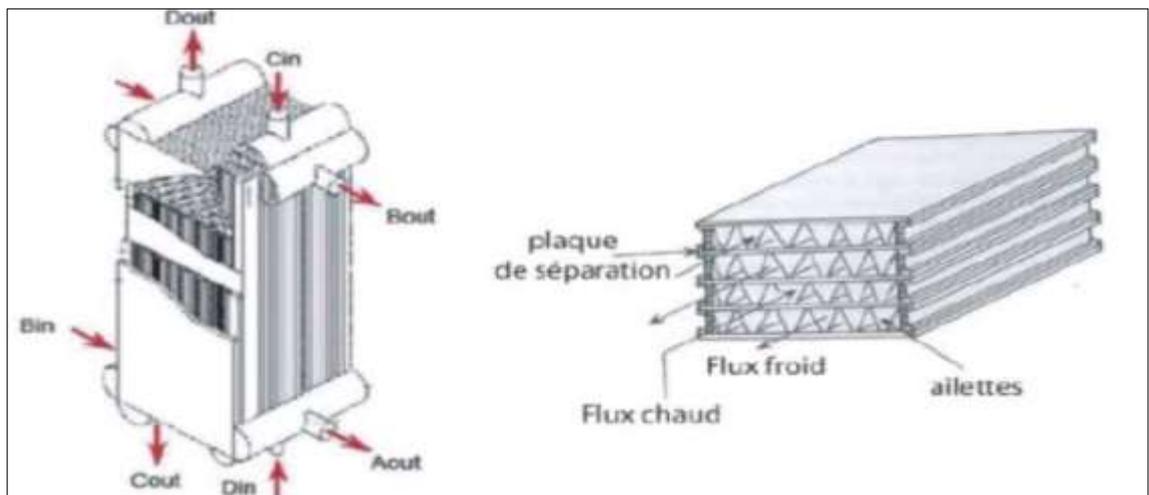


Figure III.6 : Schéma d'un échangeur plaques et ailettes en aluminium. [33]

### III.7.3 Les régénérateurs : [33]

Le régénérateur est destiné à stocker momentanément la chaleur cédée par le fluide haute pression s'écoulant de la température ambiante  $T$  à la température froide  $T$  avant de la restituer à ce fluide repassant de  $T$  et  $T$  après détente. Il joue un rôle essentiel dans l'efficacité d'un Cryo réfrigérateur à flux alterné, idéalement, ce régénérateur devrait avoir :

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

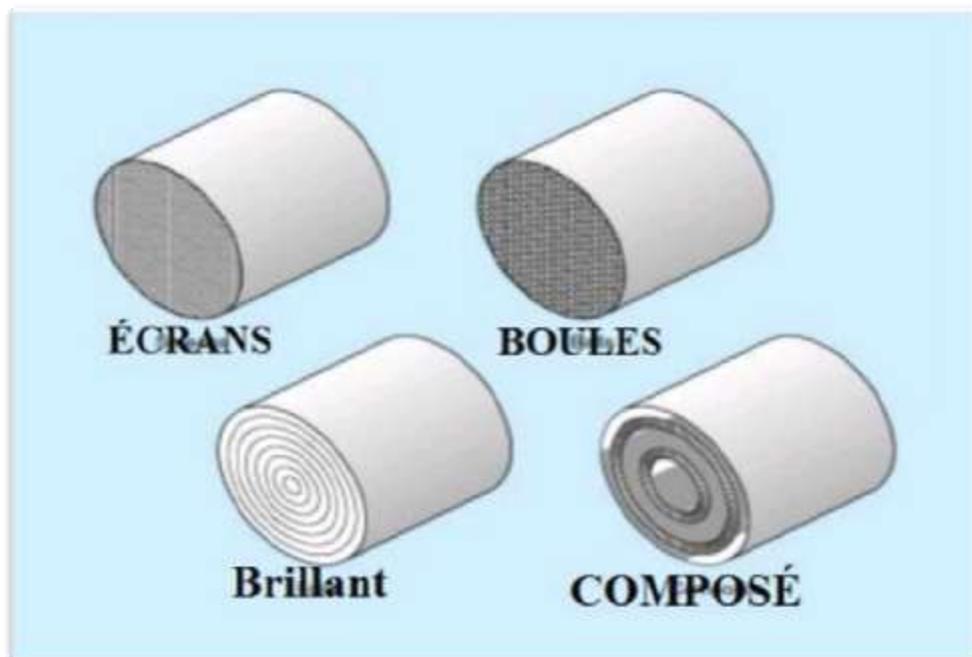


Figure III.7 : Les différents types de régénérateurs. [33]

### **III.7.4 Machines de détente cryogénique:**

#### **a) le détendeur alternatif:**

Fut la première de détente utilisée. Il est encore apprécié par les opérateurs de petits appareils de laboratoire qui peuvent en assurer facilement l'entretien. Sa vitesse de rotation est limitée à 300 tr/min. Lorsque le débit volumétrique à traiter augmente, il devient rapidement impossible d'augmenter la cylindrée et la vitesse de rotation. Seule la turbine permet d'apporter la fiabilité et l'efficacité requises. [33]

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

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

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

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



# **CHAPITRE IV: LA SIMULATION ASPEN HYSYS**

#### **IV.1. Introduction:**

Le programme fournit également un environnement de modélisation de colonne de distillation très flexible et facile à utiliser. De plus, la nature interactive de HYSYS permet aux utilisateurs de créer et d'utiliser leurs modèles rapidement et efficacement. Aspen HYSYS offre une base thermodynamique complète pour un calcul précis des propriétés physiques, des propriétés de transport et du comportement des phases pour les industries du pétrole et du gaz et du raffinage.

Bibliothèque complète de modèles d'opérations unitaires, y compris la distillation, les réacteurs, les opérations de transfert de chaleur, les équipements rotatifs, les contrôleurs et les opérations logiques dans les environnements en régime permanent et dynamique [38].

La simulation de processus est utilisée pour la conception, le développement, l'analyse et l'optimisation de processus techniques et est principalement appliquée aux usines chimiques et aux processus chimiques, mais également aux centrales électriques et aux installations techniques similaires.

La simulation de processus est une représentation basée sur un modèle de processus chimiques, physiques, biologiques et d'autres processus techniques et opérations unitaires dans un logiciel.

Les prérequis de base sont une connaissance approfondie des propriétés chimiques et physiques [39].

La simulation est l'imitation du fonctionnement d'un processus ou d'un système du monde réel au fil du temps [40]. La simulation peut être utilisée pour montrer les effets réels éventuels de conditions et de plans d'action alternatifs. La simulation est également utilisée lorsque le système réel ne peut pas être engagé, car il peut ne pas être accessible, ou il peut être dangereux ou inacceptable de l'engager, ou il est en cours de conception mais pas encore construit, ou il peut simplement ne pas exister [41].

## **IV.2. Modes de simulation :**

Il existe deux modes de simulation:[42]

### **A. Mode d'état stable :**

Initialement, la simulation de processus a été utilisée pour simuler les processus d'état stable. Les modèles d'état stable effectuent un bilan de masse et d'énergie d'un processus stationnaire (un processus dans un état d'équilibre), mais tout changement dans le temps devait être ignoré.

### **B. Mode dynamique:**

La simulation dynamique est une extension de la simulation de processus en régime permanent dans laquelle la dépendance temporelle est intégrée dans les modèles via des termes dérivés, c'est-à-dire l'accumulation de masse et d'énergie.

L'avènement de la simulation dynamique signifie que la description, la prédiction et le contrôle dépendant du temps de processus réels en temps réel sont devenus possibles.

Cela comprend la description du démarrage et de l'arrêt d'une usine, les changements de conditions pendant une réaction, les blocages, les changements thermiques et plus encore.

Les simulations dynamiques nécessitent un temps de calcul accru et sont mathématiquement plus complexes qu'une simulation en régime permanent.

Il peut être vu comme une simulation en régime permanent répétée plusieurs fois (basée sur un pas de temps fixe) avec des paramètres en constante évolution [43],[ 44].

### **IV.3. Simulation d'équipement:**

En raison de la nature dangereuse et coûteuse de la formation sur les équipements lourds, la simulation est devenue une solution courante dans de nombreuses industries.

Les types d'équipements simulés comprennent les équipements de traitement, les récupérateurs miniers et les équipements de construction, entre autres. Souvent, les unités de simulation incluront des scénarios prédéfinis par lesquels enseigner aux stagiaires, ainsi que la possibilité de personnaliser de nouveaux scénarios.

Ces simulateurs d'équipement sont destinés à créer une alternative sûre et rentable à la formation sur des équipements sous tension [43].

### **IV.4. Simulateurs de procédés chimiques:**

Voici une courte liste de logiciels utilisés pour simuler les bilans matière et énergétique des usines de traitement chimique:

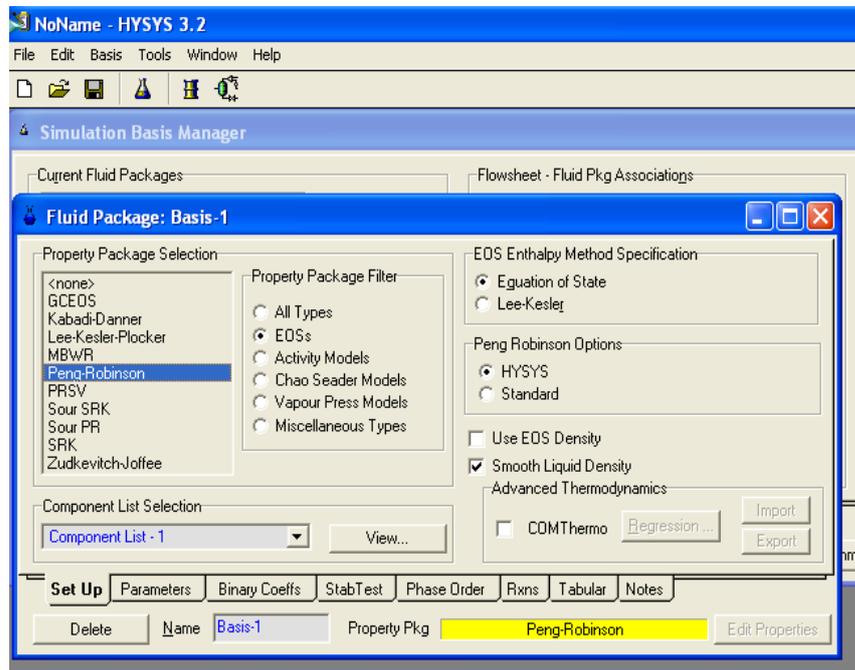
- ✓ Aspen Plus, Aspen Hysys, Aspen Custom Modeler by Aspen Technology.
- ✓ CHEMASIM.
- ✓ CHEMCAD by Chemstations.
- ✓ ProSimulateurs par Sim Infosystems.
- ✓ ProSinPlus par ProSim.
- ✓ Simulation Flowtran.
- ✓ UniSim Design & Shadow Plant par Honeywell.
- ✓ PIPE-FLO Professionnel par Engineered Software, Inc. [45]

### **IV.5. Simulation Description:**

Lors de la détermination des bilans matière et énergétique autour d'une opération unitaire, la plupart des simulateurs de processus calculent l'état du produit à partir de l'état d'alimentation donné [46].

Avant toute simulation, HYSYS doit subir une configuration initiale. Lors d'une configuration initiale, les composants et les packages de fluides à utiliser doivent être sélectionnés. Un nouveau profil de simulation est créé dans lequel le nom de la simulation et

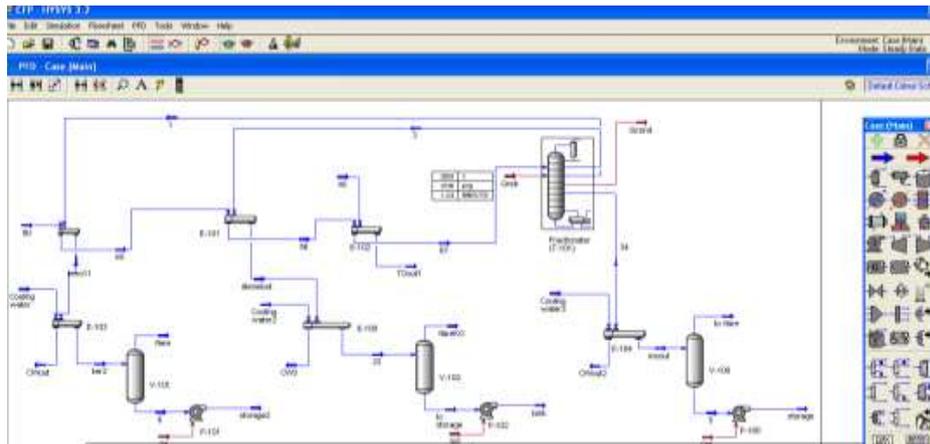
la formule sont saisis. Lors de la réalisation du PFD, les flux de matériaux sont spécifiés et entrés [38].



**Figure IV.1: Déclaration initiale des composants et des emballages de fluides.**

En connaissant le volume spécifique à l'aide de l'équation d'état, nous pouvons déterminer la taille et donc le coût de l'installation. Hysys propose l'équation d'état GCEOS, Kabadi-Danner, Peng Robinson (PR), MBWR, PRSV, Soave Redlich Kwong (SRK), Zudkevitch etc. Parmi celles-ci, l'équation d'état de Peng Robinson prend en charge la plus large gamme de conditions de fonctionnement.

Un organigramme de processus chimique est une représentation conceptuelle de la transformation de matières premières en produits par une série d'opérations unitaires de processus reliées par des flux de processus.



**Figure IV.2: écran HYSYS avec différents types d'équipements de traitement dans un processus de raffinerie.**

#### **IV.6. Travailler avec des équipements de base:**

HYSYS intègre les modèles mathématiques pour de nombreuses opérations d'unité de processus et sait quel algorithme mathématique d'une unité de processus utiliser en fonction de quelles variables nous avons spécifiées.

Certaines des opérations de l'unité de traitement telles que le flux de matière, le flux d'énergie, le séparateur de composants, le compresseur/détendeur, le refroidisseur/réchauffeur, l'échangeur de chaleur, le mélangeur, le réacteur, le segment de tuyau, la pompe, les opérations du réacteur, le séparateur, le réservoir, la colonne, le té, la vanne, etc. pris en charge par HYSYS sont discutés comme suit :

##### **IV.6.1. Pompe:**

La pompe est utilisée pour augmenter la pression d'un flux de processus liquide.

Dans l'environnement de simulation, un flux bien défini est pris comme alimentation d'entrée de la pompe, le flux de sortie et le nom de l'énergie sont déclarés sur l'onglet de connexion.

Et dans l'onglet paramètre, le Delta P calculé est déclaré. En fonction des informations spécifiées, la pompe calcule soit une température, une pression ou une efficacité de pompe inconnues. Il calcule également le devoir de la pompe.

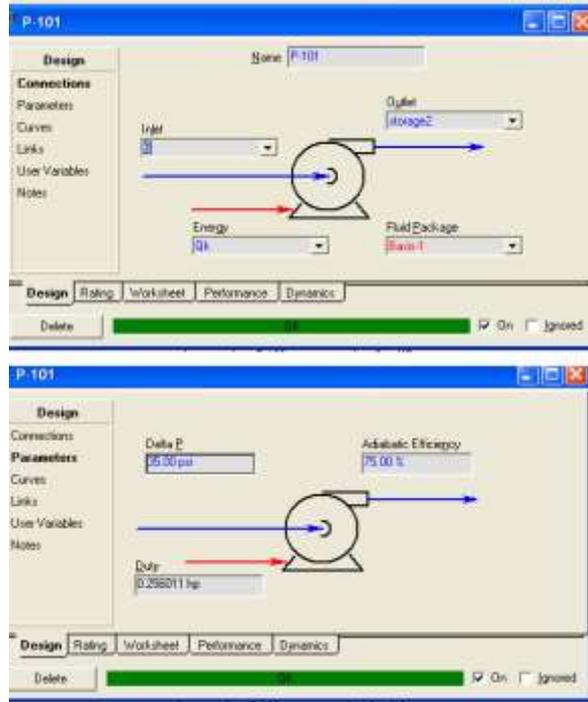


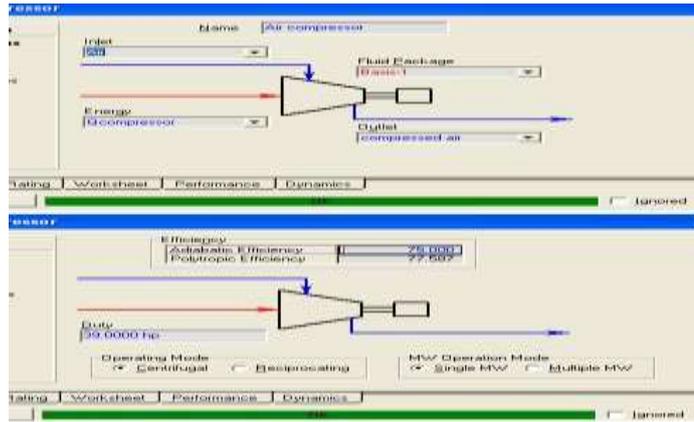
Figure IV.3: Mise en contact de la pompe avec les flux.

#### IV.6.2. Compresseur:

Le fonctionnement du compresseur est utilisé pour augmenter la pression sur le flux de gaz d'entrée.

En fonction des informations spécifiées, le compresseur calcule soit une température, une pression ou une efficacité de compresseur inconnues.

Il calcule également le devoir de la pompe.



**Figure IV.4: Contacter Compresseur avec Streams.**

### IV.6.3. Échangeur de chaleur:

L'échangeur de chaleur effectue des calculs bilatéraux d'énergie et de bilan matière.

L'échangeur de chaleur est très flexible et peut résoudre la température, la pression, les flux de chaleur (y compris les pertes de chaleur et les fuites de chaleur), les flux de matériaux.

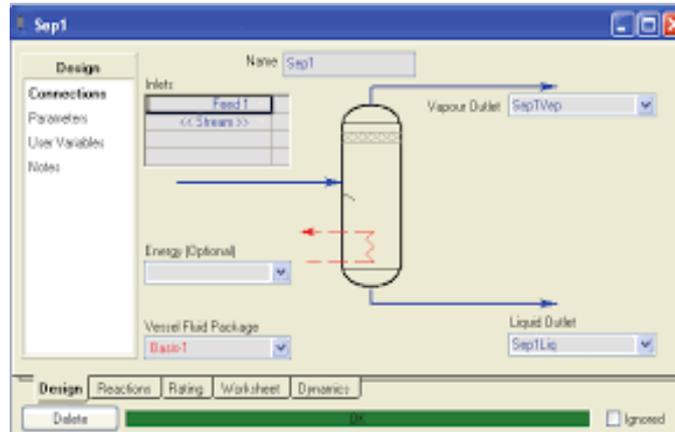
Dans HYSYS, le modèle d'échangeur de chaleur peut être sélectionné et l'un des paramètres ou les débits sont mentionnés pour en obtenir un autre. Cela peut être fait en régime permanent ainsi qu'en mode dynamique de simulation.

L'échangeur de chaleur à coque et tube HYSYS est présenté ci-dessous comme modèle du processus.



**IV.6.5. Navire:**

En mode régime permanent, le contenu du récipient en ses phases vapeur et liquide constitutives. La vapeur et le liquide dans le récipient sont autorisés à atteindre l'équilibre, avant qu'ils ne soient séparés.

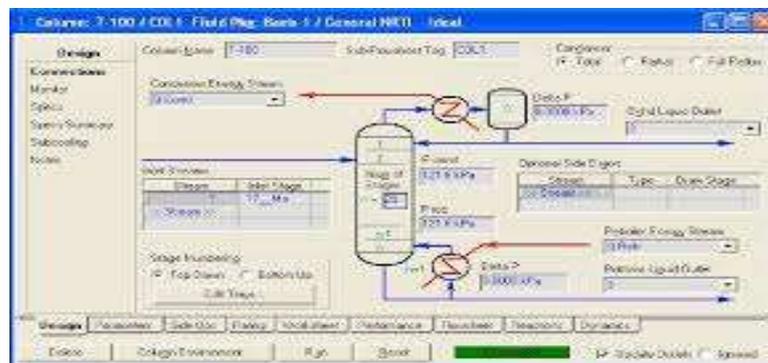


**Figure IV.7: Simulation d'un navire.**

**IV.6.6. Tour d'absorption avec rebouilleur:**

Les conditions et la composition du flux d'alimentation de la colonne, ainsi que la pression de fonctionnement, définissent la solution convergée résultante.

La solution convergente inclut les conditions et la composition des flux de produits vapeur et liquide. Le rebouilleur nécessite un flux d'énergie pour faire bouillir l'absorbant.



**Figure IV.8: Absorption rebouillie.**

### IV.6.7. Séparation:

Le courant de produit est introduit dans un séparateur à 3 phases et la phase liquide légère est séparée de la phase liquide lourde et de la vapeur résiduelle. HYSYS met normalement de l'eau en phase lourde lorsqu' il y a un débit d'eau non nul.

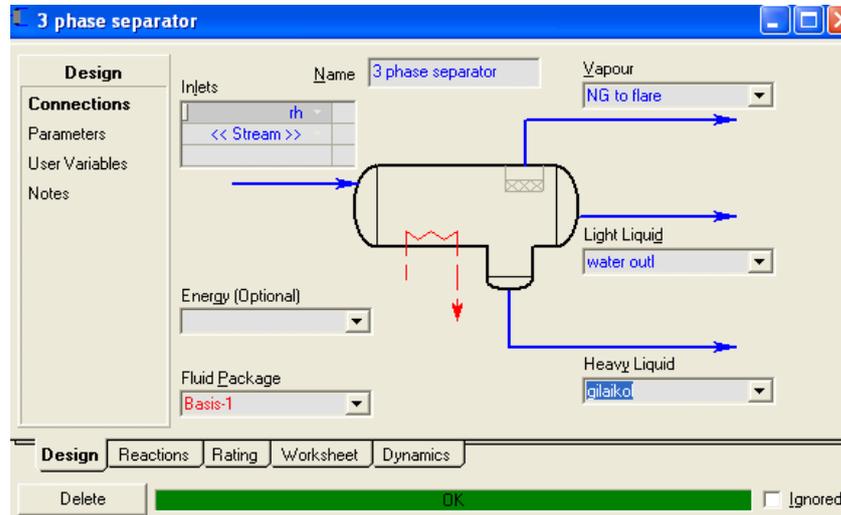


Figure IV.9: Écran séparateur triphasé.

### IV.6.8. Chauffage:

Le réchauffeur chauffe un ou plusieurs flux de processus. Le réchauffeur sert à atteindre une température élevée dans le ou les flux. Pour simuler les flux d'entrée et de sortie bien définis du réchauffeur, l'efficacité du réchauffeur avec l'utilité doit être attribuée.

### IV.7. Candidatures:

Hysys est principalement destiné à l'industrie des procédés pétroliers et gaziers, mais il est étendu à diverses industries pour la simulation comme :

- ✓ Industrie pétrolière.
- ✓ Raffinerie de pétrole.
- ✓ Industrie chimique lourde.
- ✓ Industrie pétrochimique.
- ✓ Usine de traitement du gaz naturel.
- ✓ Production de gaz de synthèse.
- ✓ Adoucissement des gaz acides avec DEA (diéthanolamine).
- ✓ Usine d'éthanol.

- ✓ Usine de biodiesel.
- ✓ production d' oxygène.

#### **IV.8. Avantages de HYSYS:**

- ✓ Améliorez l'efficacité de l'ingénierie jusqu'à 30 %.
- ✓ Améliorez l'efficacité énergétique jusqu'à 30 % et réduisez les coûts d'investissement de 10 à 30 %.
- ✓ Hysys offre une approche extrêmement puissante de la simulation en régime permanent.
- ✓ L'approche Hysys de la modélisation maximise le retour sur le temps de simulation grâce à une meilleure compréhension des processus.
- ✓ Aspen Hysys offre une base thermodynamique complète pour un calcul précis des propriétés physiques, des propriétés de transport et du comportement des phases et les nouvelles versions d'Hysys ont presque doublé leurs capacités sur les propriétés physiques.
- ✓ Aspen Hysys a introduit la nouvelle approche des simulations en régime permanent et dynamique dans la même plate-forme. Il est devenu la norme de facto dans l'industrie et jouit aujourd'hui d'une acceptation universelle.
- ✓ Aspen Hysys permet aux ingénieurs de procéder d'estimer les émissions de gaz à effet de serre associées à un procédé.
- ✓ La technologie de réacteur de raffinerie, qui comprend la catalyse fluidisée, l'hydrocraquage et l'hydrotraitement, le reformage et l'isomérisation, permet à Aspen Hysys d'effectuer des simulations à une seule unité, à plusieurs unités ainsi qu'à l'échelle de la raffinerie [38][47].

#### **IV.9. Limites:**

Contrairement à Aspen, Hysys n'attend pas que nous ayons tout saisi pour commencer les calculs. Il calcule toujours autant qu'il le peut à tout moment et les résultats sont toujours disponibles même pendant les calculs. Toutes les modifications apportées aux données sont automatiquement propagées dans tout le programme à n'importe quel endroit où cette entrée apparaît et tous les recalculs nécessaires sont instantanément effectués. Cela crée un problème lorsqu'il n'est pas nécessaire de recalculer l'ensemble du schéma de traitement à chaque fois qu'il y a un petit changement.

#### **IV.10. Conclusions :**

La simulation des équipements est l'un des travaux de base pour la conception de toute usine de traitement chimique et pour étudier les conditions du processus. HYSYS est un outil efficace pour mener à bien la conception d'un procédé pour un système industriel. L'objectif d'Hysys est de fournir la capacité de concevoir un processus complet de manière complète et précise. Un ingénieur de procédés ou un étudiant construit d'abord un PFD montrant tous les équipements réels nécessaires. Le recalcul de n'importe quel équipement est très facile et ne nécessite que quelques secondes. Dans l'ensemble, l'utilisation de cette approche de simulation sera utile pour toute usine de traitement afin d'optimiser le profit annuel.

**CHAPITRE V: PARTIE PRATIQUE  
ET DISCUSSION DES  
RESULTATS.**

## **V.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons simuler ce processus avec un exemple :

Cycle de liquéfaction et séparation des gaz de l'air, sans argon. (cycle Claude)

Tout d'abord, nous introduisons les étapes de simulation du processus de séparation des gaz

Air. , on va présenter les équipements utilisés Nous utilisons ensuite le simulateur HYSYS pour effectuer ces processus.

Enfin, nous discuterons des résultats obtenus après projection sur le logiciel HYSYS.

## **V.2 Les étapes de simulation :**

Pour réaliser la simulation du procédé par le simulateur hysys il est nécessaire de passe par les étapes suivantes :

### **V.2.1 Introduction les compositions :**

Pour la simulation de processus avec le simulateur HYSYS, il est nécessaire de

Au départ, vous devez préciser à HYSYS la composition chimique du fluide à utiliser dans le cycle.

Dans notre cas, il faut définir la combinaison

| Component | Value  | Value  |
|-----------|--------|--------|
| H2O       | 0.0000 | 0.0000 |
| Air       | 0.0000 | 0.0000 |
| Nitrogen  | 0.7800 | 0.7800 |
| Oxygen    | 0.2200 | 0.2200 |

Total: 1.00000

**Figure V.1: Résultats des La composition du gaz de l'air**

### V.2.2 Choix de modèle d'équation d'état fluide package :

Pour étudier les propriétés des gaz réels ou des mélanges les plus complexes, nous avons L'équation d'état liée aux paramètres d'équilibre du système.

De nombreuses équations d'état ont été proposées et continuent d'être développées.

Parmi ces équations, on cite : l'équation de Peng Robinson, l'équation de Redlich Kwong et Lee Kesler Plocker... etc.

Dans notre cas de gaz de l'air, nous utilisons l'équation de Peng Robinson :

Elle s'adresse strictement à tous les systèmes constitués de monophasés, biphasés ou monophasés

Système triphasé, haute efficacité et haute précision, adapté à large éventail de conditions

### V.3 Composants de procédé :

Le cycle de Claude se compose des équipements suivants :

Material Stream: AIR

Worksheet Attachments Dynamics

| Worksheet         | Stream Name                   | AIR        | Vapour Phase |
|-------------------|-------------------------------|------------|--------------|
| Conditions        | Vapour / Phase Fraction       | 1.0000     | 1.0000       |
| Properties        | Temperature [C]               | 32.00      | 32.00        |
| Composition       | Pressure [kPa]                | 100.0      | 100.0        |
| Oil & Gas Feed    | Molar Flow [kgmole/h]         | 634.5      | 634.5        |
| Petroleum Assay   | Mass Flow [kg/h]              | 1.833e+004 | 1.833e+004   |
| K Value           | Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 21.12      | 21.12        |
| User Variables    | Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | 196.4      | 196.4        |
| Notes             | Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 152.6      | 152.6        |
| Cost Parameters   | Heat Flow [kJ/h]              | 1.246e+005 | 1.246e+005   |
| Normalized Yields | Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 1.499e+004 | 1.499e+004   |
| Emissions         | Fluid Package                 | Basis-1    |              |
|                   | Utility Type                  |            |              |

OK

Delete Define from Stream... View Assay

Figure V.2 : Paramètre d'entrée-

### V.3.1 Avant recyclage:

#### V 3.1.1 Compresseur axial (k-100) :

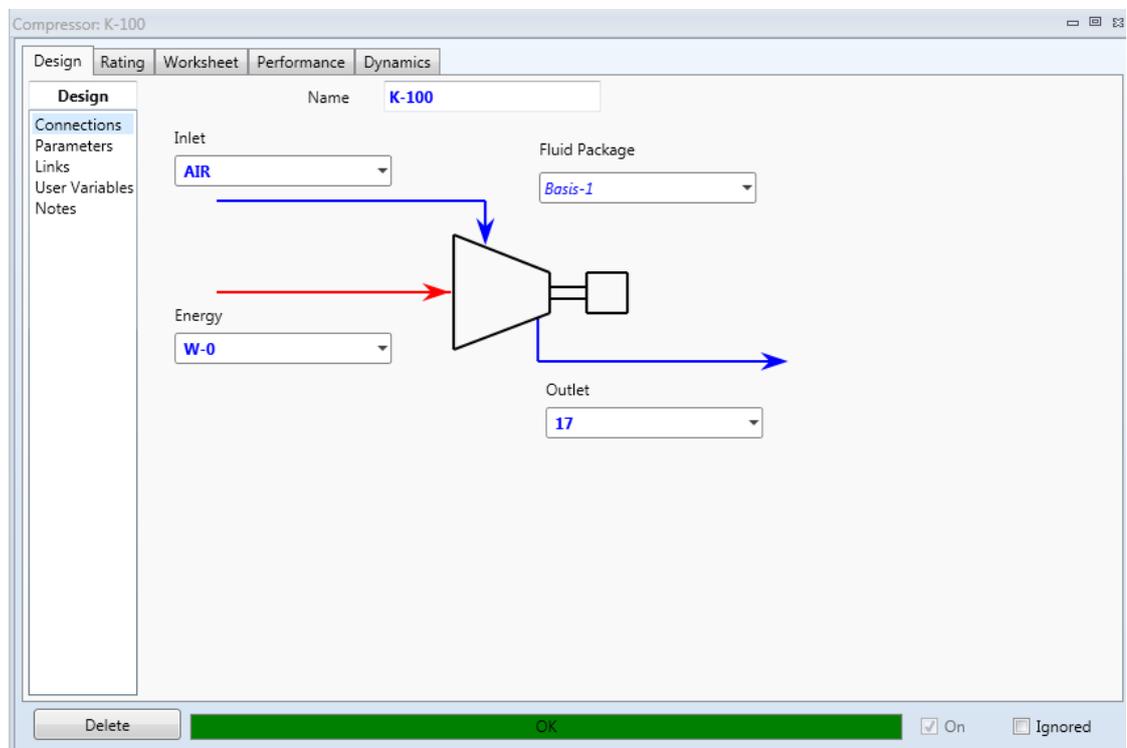


Figure V.3 : compresseur axial.

Le compresseur absorbe l'air à basse pression (32 °C ; 267.1bar) et le refoule à (100°C ;514 bar) vers Le refroidisseur (Ac-100)

| Name                          | 17         | 29         |
|-------------------------------|------------|------------|
| Vapour                        | 1.0000     | 1.0000     |
| Temperature [C]               | 267.1      | 32.00      |
| Pressure [kPa]                | 514.8      | 514.0      |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 634.5      | 634.3      |
| Mass Flow [kg/h]              | 1.833e+004 | 1.833e+004 |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 21.12      | 21.12      |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | 7234       | 164.7      |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 156.0      | 138.9      |
| Heat Flow [kJ/h]              | 4.590e+006 | 1.043e+005 |

Figure V.4 : Paramètre d'entrée-sortie du compresseur.

### V.3.1.2 Le refroidisseur (Ac-100) :

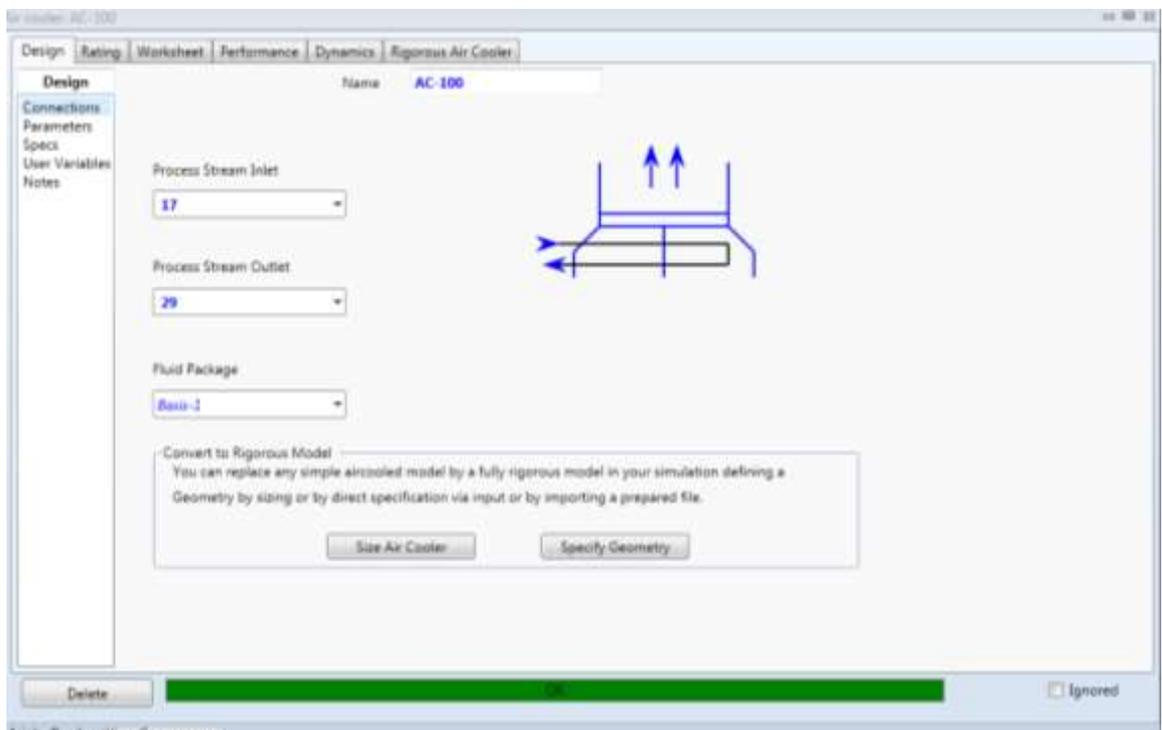


Figure V.5 : Le refroidisseur.

Ce refroidisseur a d'abaisser la température de l'air au 1er lieu de (267.1 °C ;514 bar) Jusqu'à (32 °C ;524bar).

| Worksheet   | Name                          | 17         | 29         |
|-------------|-------------------------------|------------|------------|
| Conditions  | Vapour                        | 1.0000     | 1.0000     |
| Properties  | Temperature (C)               | 267.1      | 32.00      |
| Composition | Pressure (kPa)                | 514.0      | 514.0      |
| FF Specs    | Molar Flow (kgmole/h)         | 634.5      | 634.5      |
|             | Mass Flow (kg/h)              | 1.833e+004 | 1.833e+004 |
|             | Std Ideal Liq Vol Flow (m3/h) | 21.12      | 21.12      |
|             | Molar Enthalpy (kJ/kgmole)    | 7234       | 164.7      |
|             | Molar Entropy (kJ/kgmole-C)   | 156.0      | 138.9      |
|             | Heat Flow (kJ/h)              | 4.590e+008 | 1.045e+005 |

Figure V.6 : Paramètre d'entrée-sortie du refroidisseur.

### V.3.1.3 L'échangeur (E-101) :

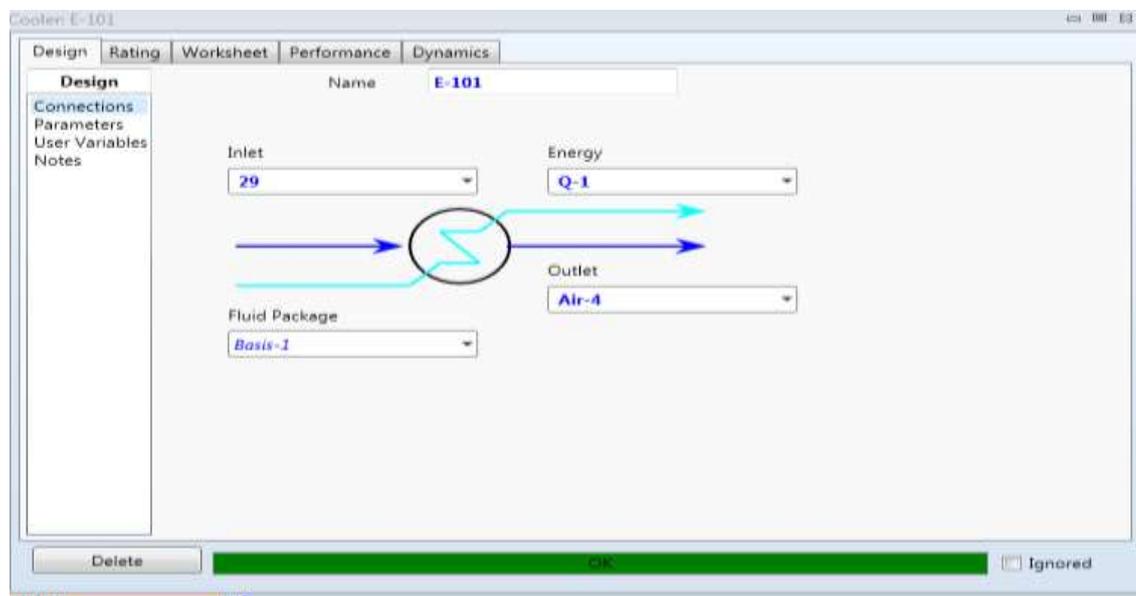


Figure V.7 : l'échangeur.

cooler: E-101

Design Rating Worksheet Performance Dynamics

**Worksheet**

| Name                          | 29         | Air-4       | Q-1        |
|-------------------------------|------------|-------------|------------|
| Vapour                        | 1.0000     | 1.0000      | <empty>    |
| Temperature [C]               | 32.00      | 8.000       | <empty>    |
| Pressure [kPa]                | 514.0      | 514.0       | <empty>    |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 634.5      | 634.5       | <empty>    |
| Mass Flow [kg/h]              | 1.833e+004 | 1.833e+004  | <empty>    |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 21.12      | 21.12       | <empty>    |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | 164.7      | -541.0      | <empty>    |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 138.9      | 136.4       | <empty>    |
| Heat Flow [kJ/h]              | 1.045e+005 | -3.432e+005 | 4.477e+005 |

Delete OK Ignored

Figure V.8 : Paramètre d'entrée-sortie de l'échangeur.

V.3.1.4 Le mixeur (mix-100) :

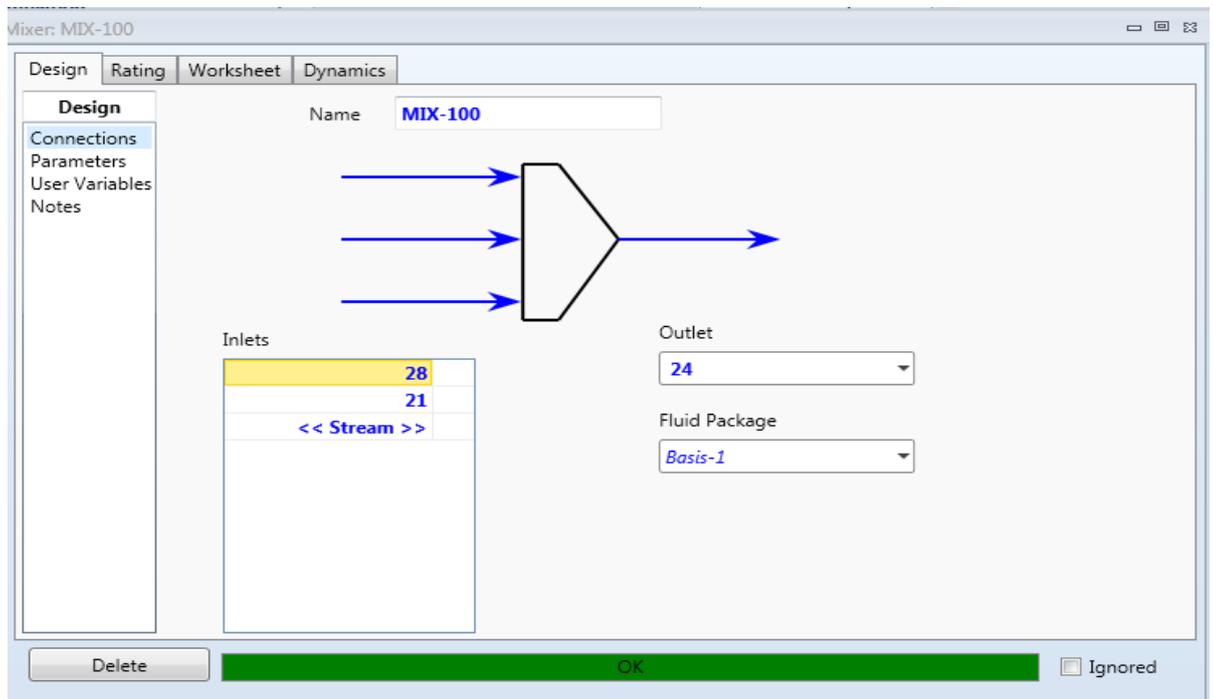


Figure V.9 : Le mixeur (mix-100).

Le rôle de mixeur c'est de faire une mixture entre deux fluides, un débit recyclé et un autre aspiré.

| Name                          | 28          | 21          | 24          |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Vapour                        | 1.0000      | 1.0000      | 1.0000      |
| Temperature [C]               | 8.000       | 8.600       | 8.407       |
| Pressure [kPa]                | 514.0       | 500.0       | 500.0       |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 190.3       | 444.1       | 634.5       |
| Mass Flow [kg/h]              | 5499        | 1.283e+004  | 1.833e+004  |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 6.335       | 14.78       | 21.12       |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -541.0      | -522.1      | -527.8      |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 136.4       | 136.7       | 136.7       |
| Heat Flow [kJ/h]              | -1.030e+005 | -2.319e+005 | -3.349e+005 |

Figure V.10 : Paramètre d'entrée-sortie du mixeur.

V.3.1.5 Le compresseur (k-101) :

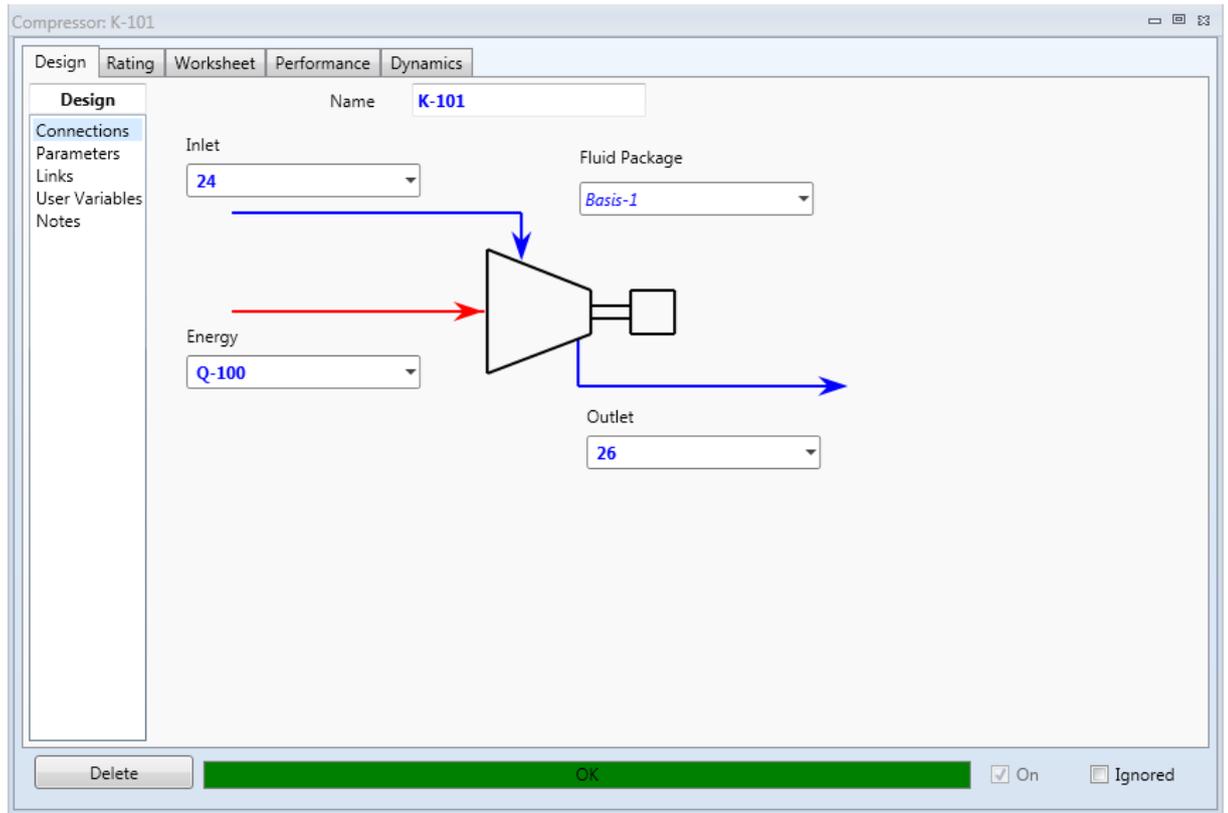


Figure V.11 : Le compresseur (k-101).

| Name                        | 24          | 26         | Q-100      |
|-----------------------------|-------------|------------|------------|
| Vapour                      | 1.0000      | 1.0000     | <empty>    |
| Temperature [C]             | 8.407       | 192.6      | <empty>    |
| Pressure [kPa]              | 500.0       | 2064       | <empty>    |
| Molar Flow [kgmole/h]       | 634.5       | 634.5      | <empty>    |
| Mass Flow [kg/h]            | 1.833e+004  | 1.833e+004 | <empty>    |
| LiqVol Flow [m3/h]          | 21.12       | 21.12      | <empty>    |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]  | -527.8      | 4921       | <empty>    |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 136.7       | 139.8      | <empty>    |
| Heat Flow [kJ/h]            | -3.349e+005 | 3.122e+006 | 3.457e+006 |

Figure V.12 : Paramètre d'entrée-sortie de compresseur.

### V.3.1.6 Le refroidissement :

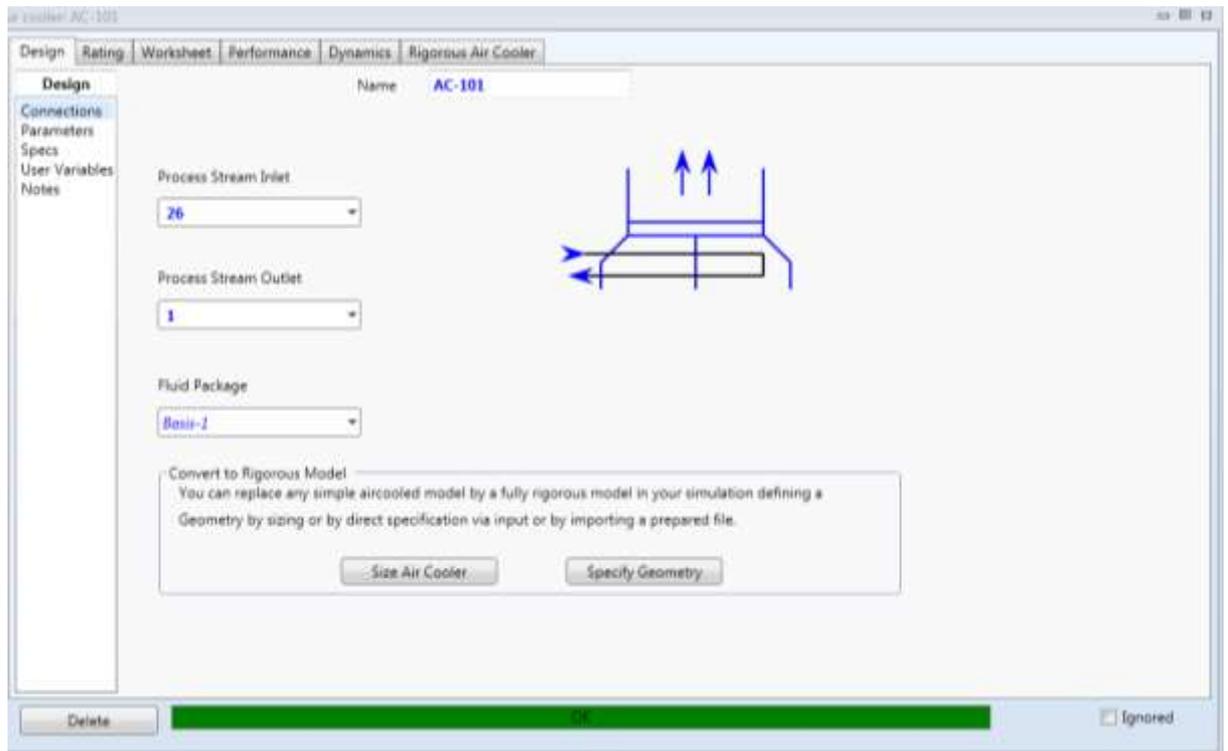


Figure V13 : Le refroidissement.

| Name                          | 26         | 1          |
|-------------------------------|------------|------------|
| Vapour                        | 1.0000     | 1.0000     |
| Temperature [C]               | 192.6      | 35.50      |
| Pressure [kPa]                | 2064       | 2064       |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 634.5      | 634.5      |
| Mass Flow [kg/h]              | 1.833e+004 | 1.833e+004 |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 21.12      | 21.12      |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | 4921       | 155.1      |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 139.8      | 127.3      |
| Heat Flow [kJ/h]              | 3.122e+006 | 9.639e+004 |

Figure V 14 : Paramètre d'entrée-sortie du refroidisseur.

V.3.1.7 Le séparateur (TEE-100):

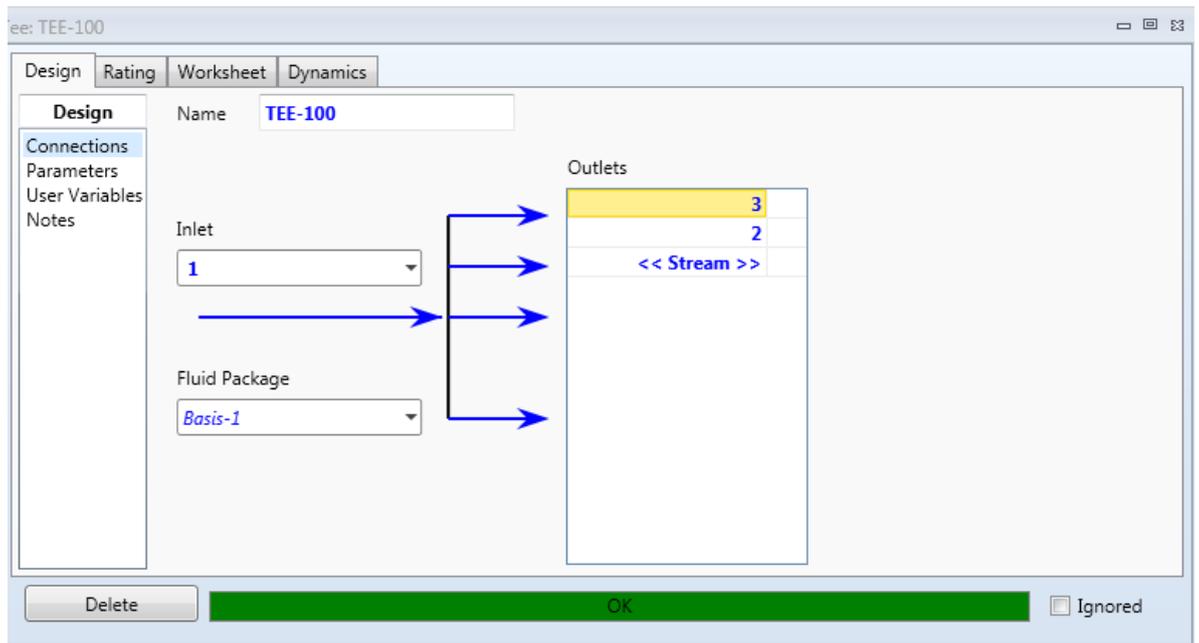


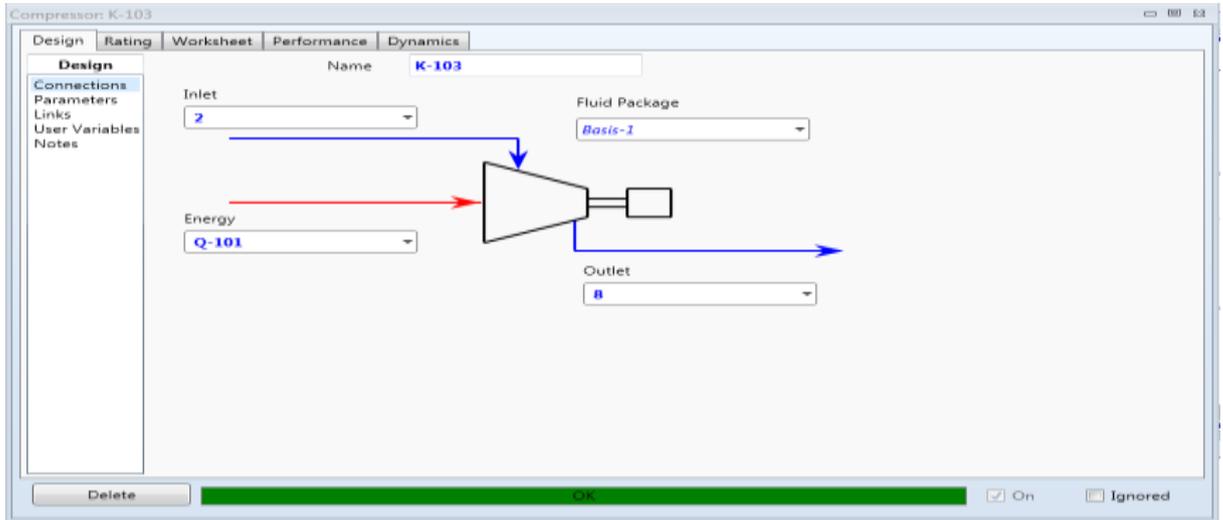
Figure V 15 : Le séparateur.

|                               | 1          | 3          | 2          |
|-------------------------------|------------|------------|------------|
| Vapour                        | 1.0000     | 1.0000     | 1.0000     |
| Temperature [C]               | 35.50      | 35.50      | 35.50      |
| Pressure [kPa]                | 2064       | 2064       | 2064       |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 634.5      | 444.1      | 190.3      |
| Mass Flow [kg/h]              | 1.833e+004 | 1.283e+004 | 5499       |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 21.12      | 14.78      | 6.335      |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | 155.1      | 155.1      | 155.1      |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 127.3      | 127.3      | 127.3      |
| Heat Flow [kJ/h]              | 9.839e+004 | 6.887e+004 | 2.952e+004 |

Figure V 16 : Paramètre d'entrée-sortie séparateur.

### V.3.2. Le recyclage :

#### V.3.2.1 Le compresseur de recyclage d'air (k-103):



**Figure V 17: Le compresseur de recyclage d'air.**

La quantité totale de l'air de processus et l'air recyclé provenant de la boîte froide sont ensuite comprimés à bars par un compresseur d'air de recyclage à 3 étages avec refroidissement intermédiaire

| Name                        | 2          | 8          | Q-101      |
|-----------------------------|------------|------------|------------|
| Vapour                      | 1.0000     | 1.0000     | <empty>    |
| Temperature [C]             | 35.50      | 62.89      | <empty>    |
| Pressure [kPa]              | 2064       | 2590       | <empty>    |
| Molar Flow [kgmole/h]       | 190.3      | 190.3      | <empty>    |
| Mass Flow [kg/h]            | 5499       | 5499       | <empty>    |
| LiqVol Flow [m3/h]          | 6.335      | 6.335      | <empty>    |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]  | 155.1      | 952.4      | <empty>    |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 127.3      | 127.9      | <empty>    |
| Heat Flow [kJ/h]            | 2.952e+004 | 1.813e+005 | 1.518e+005 |

**Figure V 18: Paramètre d'entrée-sortie du compresseur.**

V.3.2.2 le refroidissement (Ac-102):

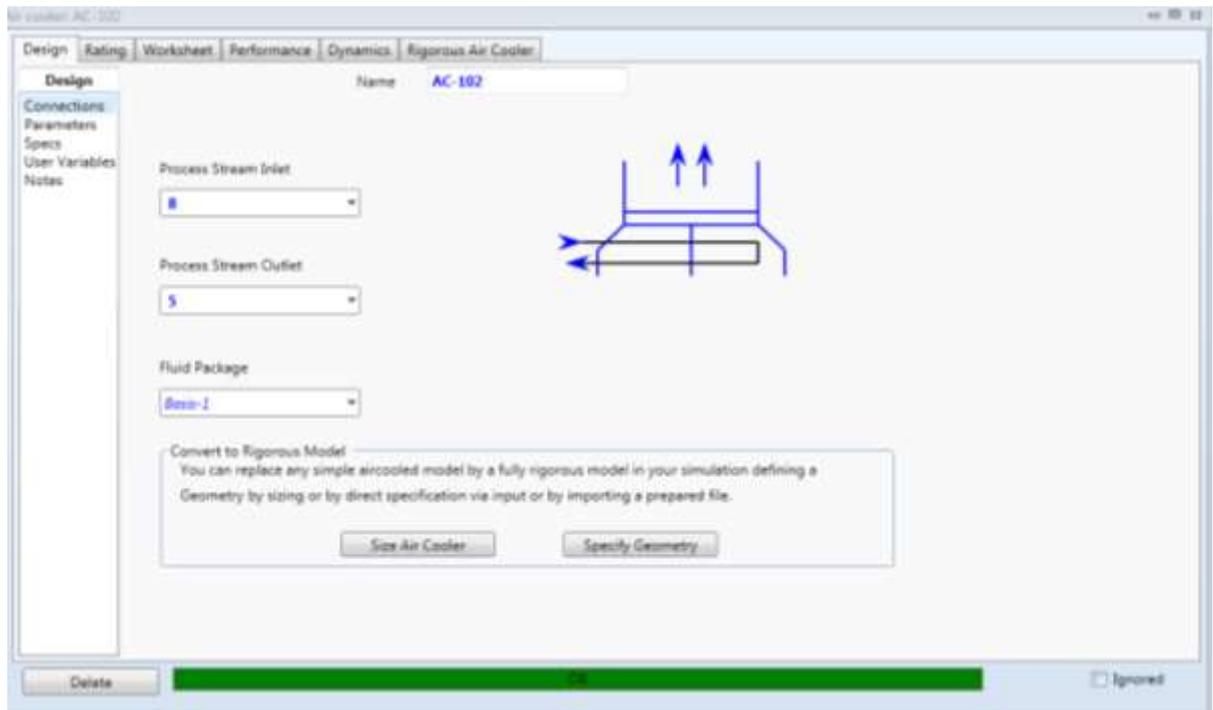


Figure V 19: le refroidissement.

| Worksheet   | Name                          | R          | S           |
|-------------|-------------------------------|------------|-------------|
| Conditions  | Vapour                        | 1,0000     | 1,0000      |
| Properties  | Temperature [C]               | 62,89      | 25,89       |
| Composition | Pressure [kPa]                | 2590       | 2590        |
| PF Specs    | Molar Flow [kgmole/h]         | 190,3      | 190,3       |
|             | Mass Flow [kg/h]              | 5499       | 5499        |
|             | Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 6,335      | 6,335       |
|             | Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | 952,4      | -175,2      |
|             | Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 127,9      | 124,4       |
|             | Heat Flow [kJ/h]              | 1,813e+005 | -3,335e+004 |

Figure V 20: Paramètre d'entrée-sortie du refroidissement.

V.3.2.3 Le compresseur :

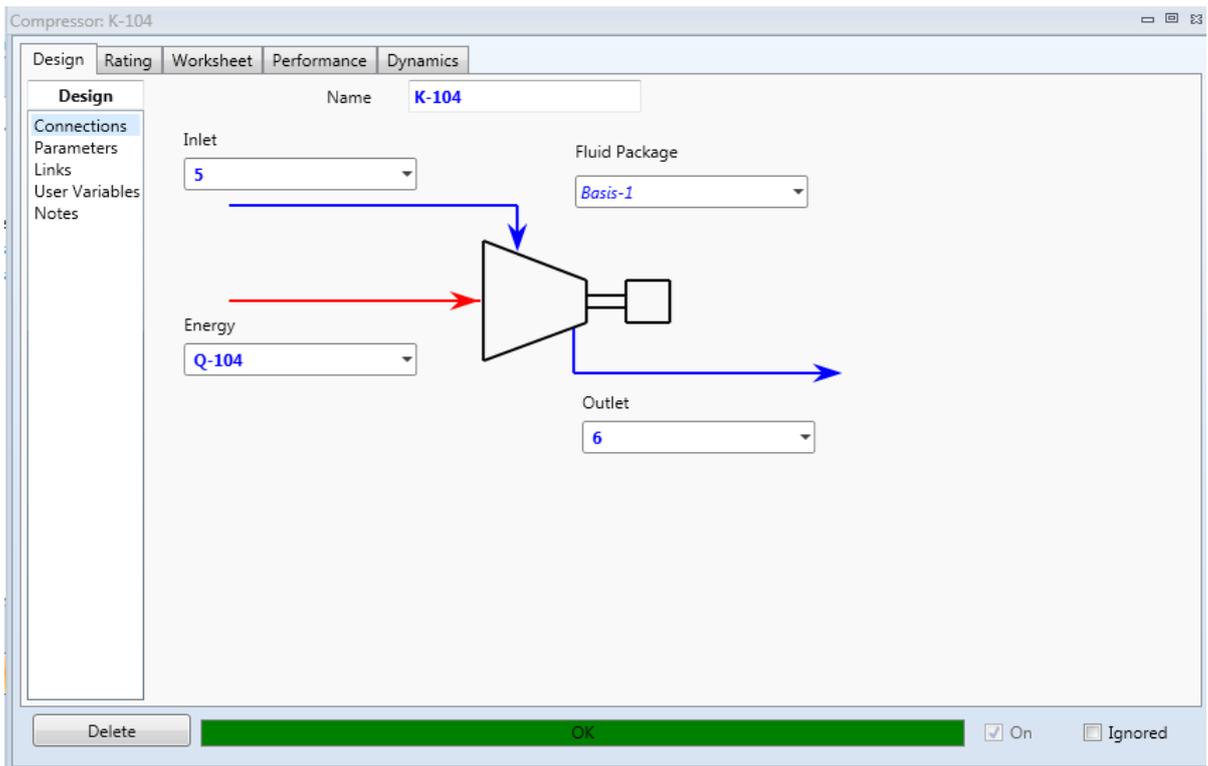


Figure V 21: Le compresseur.

| Name                        | 5           | 6          | Q-104      |
|-----------------------------|-------------|------------|------------|
| Vapour                      | 1.0000      | 1.0000     | <empty>    |
| Temperature [C]             | 25.89       | 56.79      | <empty>    |
| Pressure [kPa]              | 2590        | 3368       | <empty>    |
| Molar Flow [kgmole/h]       | 190.3       | 190.3      | <empty>    |
| Mass Flow [kg/h]            | 5499        | 5499       | <empty>    |
| LiqVol Flow [m3/h]          | 6.335       | 6.335      | <empty>    |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]  | -175.2      | 720.4      | <empty>    |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 124.4       | 125.1      | <empty>    |
| Heat Flow [kJ/h]            | -3.335e+004 | 1.371e+005 | 1.705e+005 |

Figure V 22 : Paramètre d'entrée-sortie du compresseur..

### V.3.2.4 Le refroidissement :

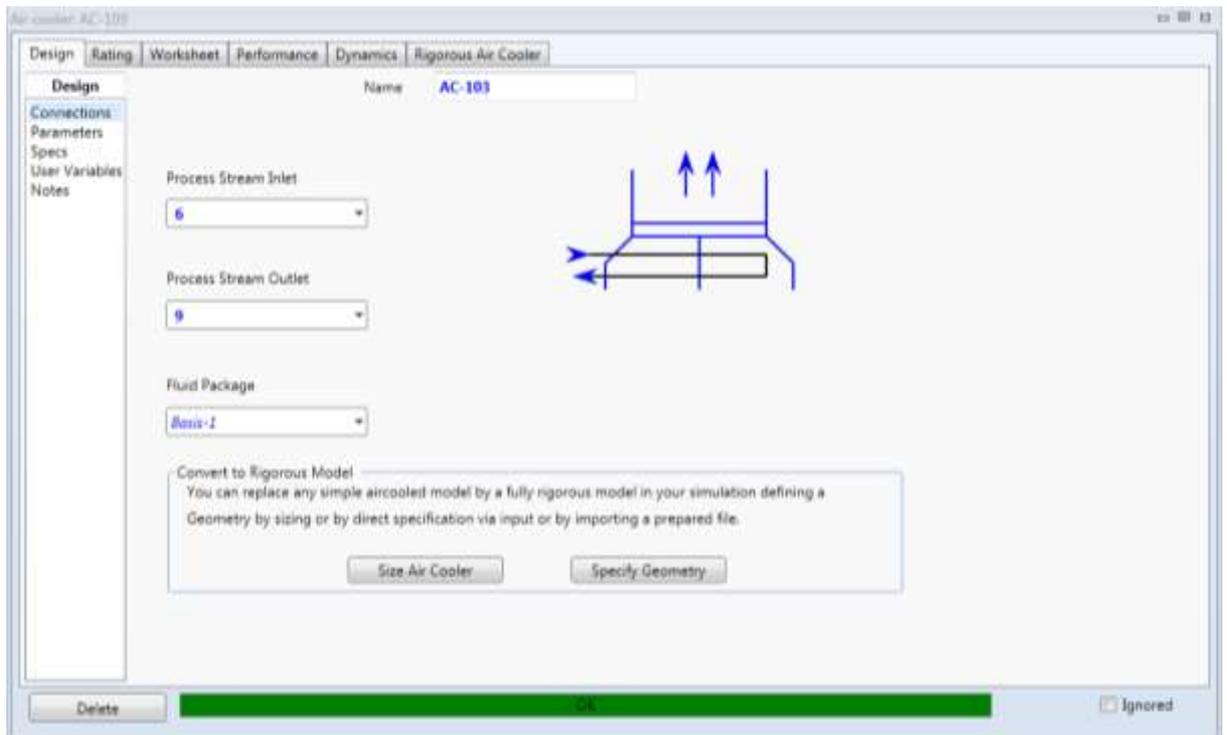


Figure V 23: le refroidissement.

|  | 6          | 9      |
|--|------------|--------|
| Name                                       | 6          | 9      |
| Vapour                                     | 1.0000     | 1.0000 |
| Temperature [K]                            | 56.79      | 34.00  |
| Pressure [kPa]                             | 3368       | 3368   |
| Molar Flow [kgmole/h]                      | 190.3      | 190.3  |
| Mass Flow [kg/h]                           | 5499       | 5499   |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m <sup>3</sup> /h] | 6.335      | 6.335  |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]                 | 720.4      | 18.12  |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]                | 125.1      | 122.8  |
| Heat Flow [kJ/h]                           | 1.371e-005 | 3449   |

Figure V24 : Paramètre d'entrée-sortie du refroidissement.

V.3.2.5 L'échangeur (E-102) :

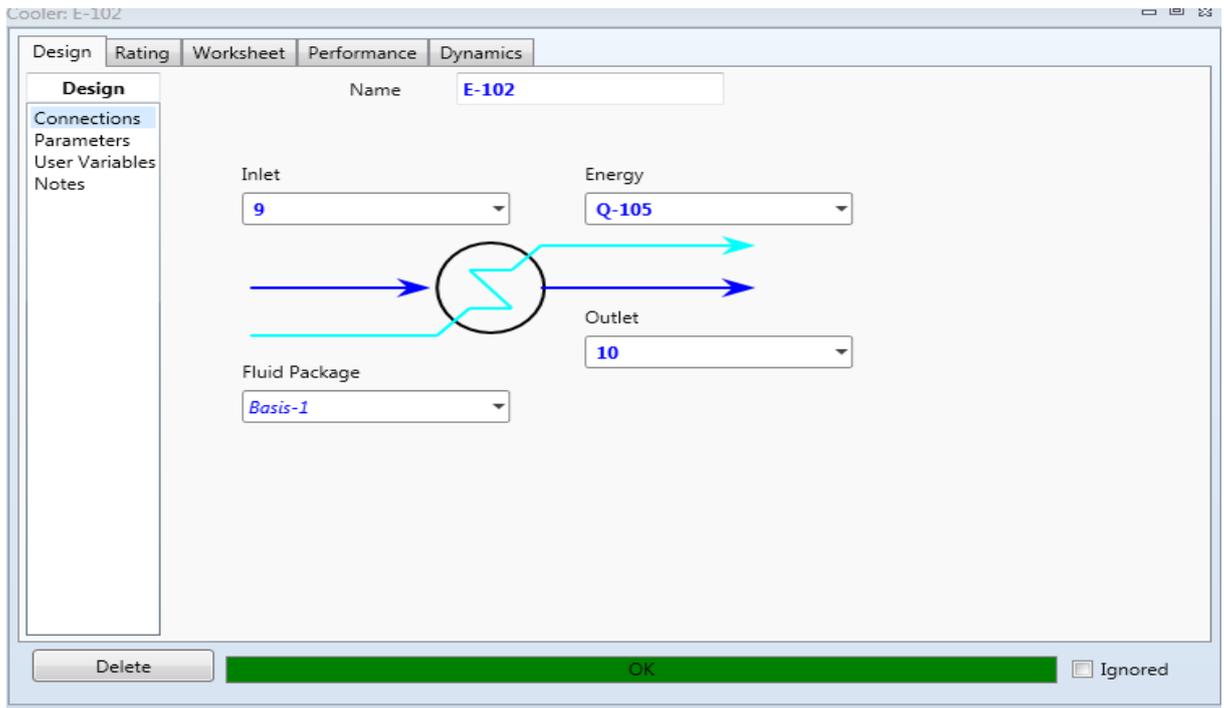


Figure V 25: L'échangeur.

| Name                          | 9      | 10          | Q-105      |
|-------------------------------|--------|-------------|------------|
| Vapour                        | 1.0000 | 1.0000      | <empty>    |
| Temperature [C]               | 34.00  | -109.0      | <empty>    |
| Pressure [kPa]                | 3368   | 3368        | <empty>    |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 190.3  | 190.3       | <empty>    |
| Mass Flow [kg/h]              | 5499   | 5499        | <empty>    |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 6.335  | 6.335       | <empty>    |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | 18.12  | -4680       | <empty>    |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 122.8  | 102.0       | <empty>    |
| Heat Flow [kJ/h]              | 3449   | -8.909e+005 | 8.943e+005 |

Figure V 26: Paramètre d'entrée-sortie du l'échangeur.

V.3.2.6 La compresseur (k-105) :

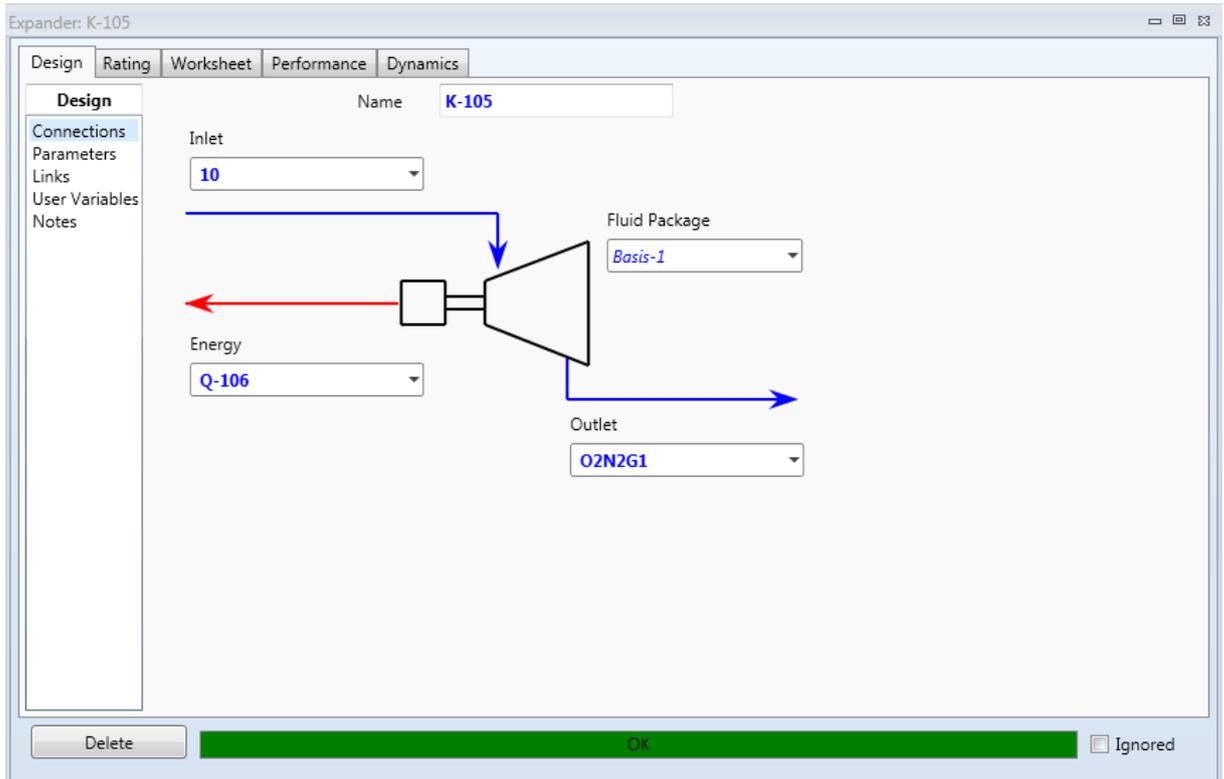


Figure V 27: le compresseur.

|                               | 10          | O2N2G1      | Q-106      |
|-------------------------------|-------------|-------------|------------|
| Name                          | 10          | O2N2G1      | Q-106      |
| Vapour                        | 1.0000      | 1.0000      | <empty>    |
| Temperature [C]               | -109.0      | -167.7      | <empty>    |
| Pressure [kPa]                | 3368        | 500.0       | <empty>    |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 190.3       | 190.3       | <empty>    |
| Mass Flow [kg/h]              | 5499        | 5499        | <empty>    |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 6.335       | 6.335       | <empty>    |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -4680       | -5721       | <empty>    |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 102.0       | 107.7       | <empty>    |
| Heat Flow [kJ/h]              | -8.909e+005 | -1.089e+006 | 1.980e+005 |

Figure V 28: Paramètre d'entrée-sortie du compresseur.

V.3.2.7 L'échangeur :

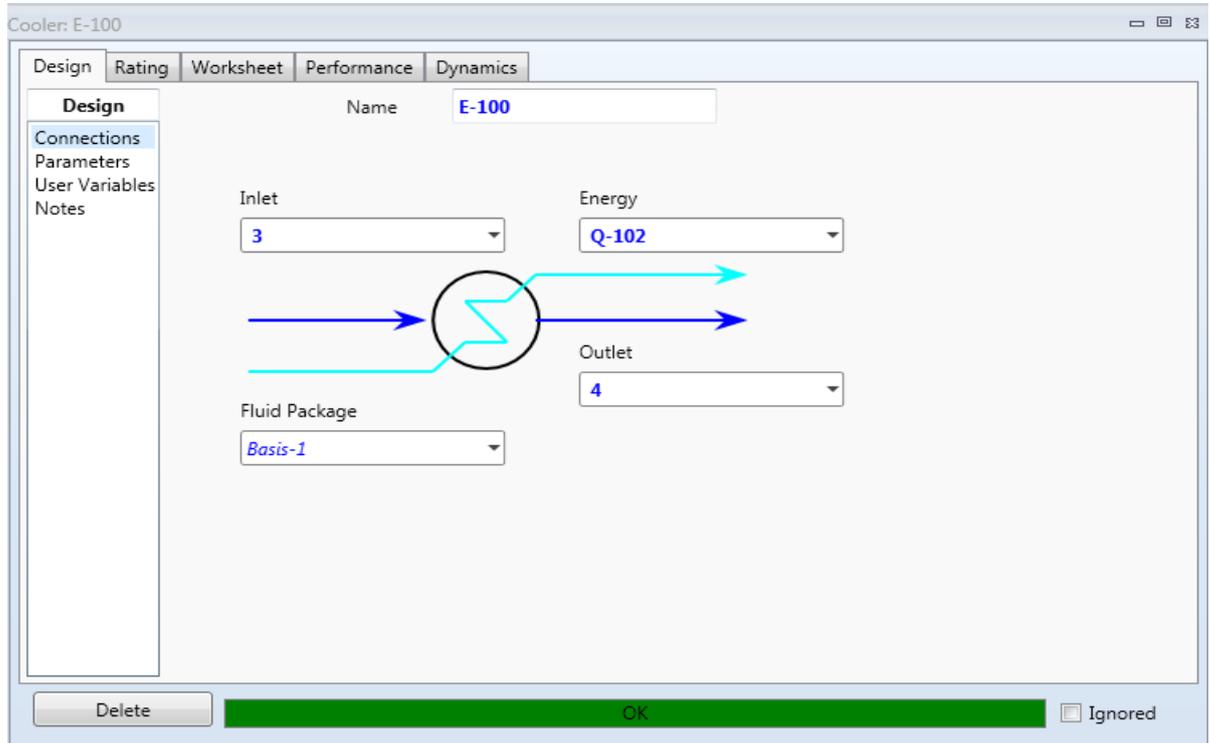


Figure V 29: l'échangeur.

| Name                          | 3          | 4           | Q-102      |
|-------------------------------|------------|-------------|------------|
| Vapour                        | 1.0000     | 1.0000      | <empty>    |
| Temperature [C]               | 35.50      | -19.00      | <empty>    |
| Pressure [kPa]                | 2064       | 2015        | <empty>    |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 444.1      | 444.1       | <empty>    |
| Mass Flow [kg/h]              | 1.283e+004 | 1.283e+004  | <empty>    |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 14.78      | 14.78       | <empty>    |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | 155.1      | -1493       | <empty>    |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 127.3      | 121.6       | <empty>    |
| Heat Flow [kJ/h]              | 6.887e+004 | -6.632e+005 | 7.320e+005 |

Figure V 30: Paramètre d'entrée-sortie du l'échangeur.

V.3.2.8 Le compresseur (k-102) :

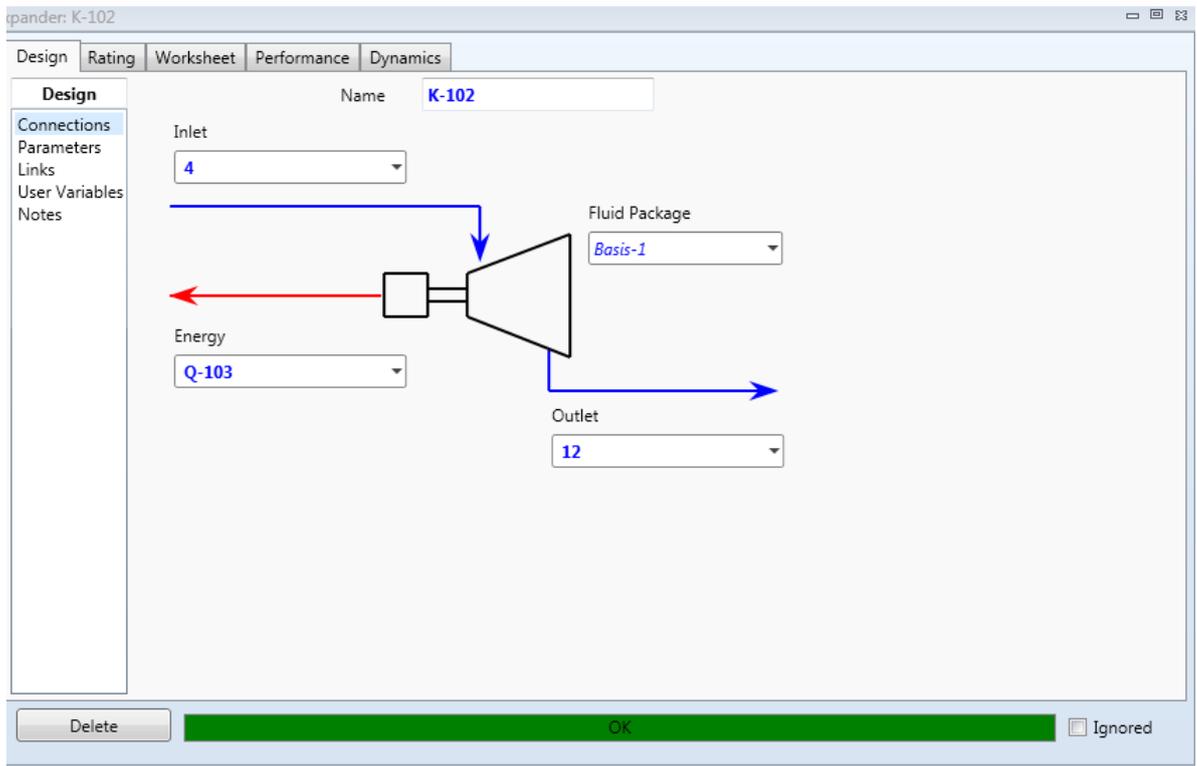


Figure V 31: le compresseur.

The screenshot shows the Aspen Plus interface for the compressor K-102, displaying the Worksheet tab. The table below shows the input and output parameters for the compressor.

|                               | 4           | 12          | Q-103      |
|-------------------------------|-------------|-------------|------------|
| Name                          | 4           | 12          | Q-103      |
| Vapour                        | 1.0000      | 1.0000      | <empty>    |
| Temperature [C]               | -19.00      | -84.97      | <empty>    |
| Pressure [kPa]                | 2015        | 500.0       | <empty>    |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 444.1       | 444.1       | <empty>    |
| Mass Flow [kg/h]              | 1.283e+004  | 1.283e+004  | <empty>    |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 14.78       | 14.78       | <empty>    |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -1493       | -3257       | <empty>    |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 121.6       | 124.9       | <empty>    |
| Heat Flow [kJ/h]              | -6.632e+005 | -1.447e+006 | 7.835e+005 |

Figure V 32: Paramètre d'entrée-sortie du compresseur.

V.3.2.9 L'échangeur (E-104):

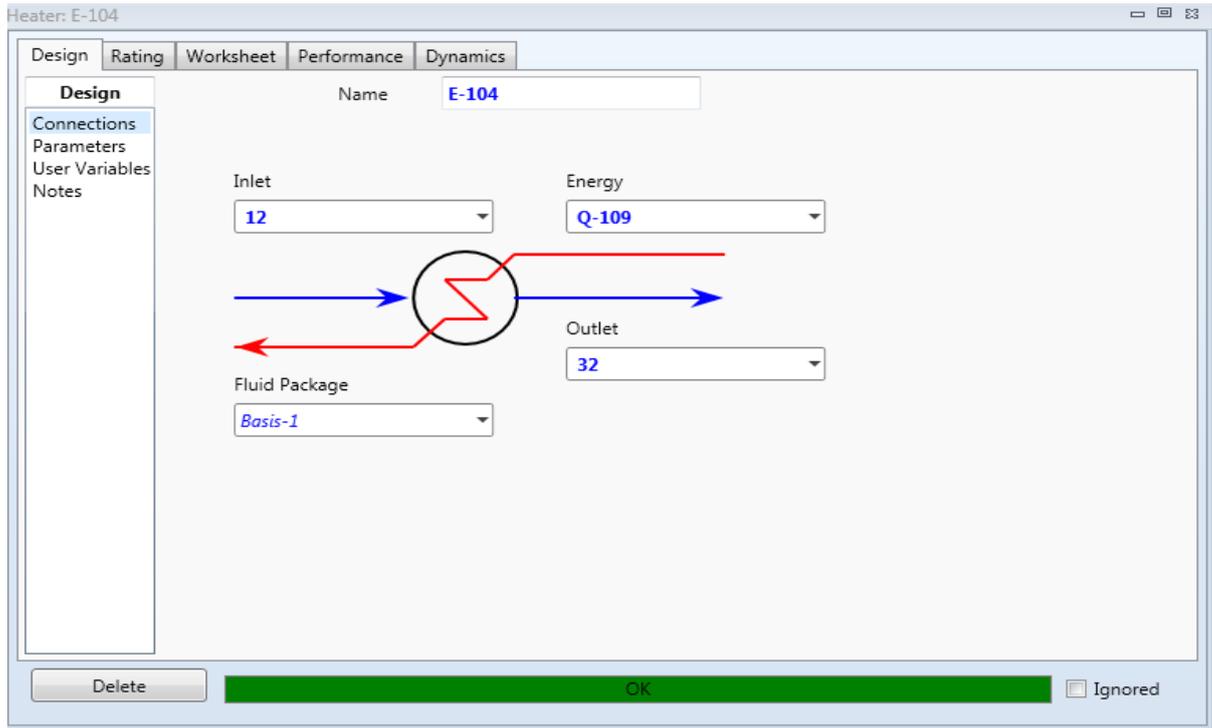


Figure V 33: l'échangeur.

| Name                          | 12          | 32          | Q-109      |
|-------------------------------|-------------|-------------|------------|
| Vapour                        | 1.0000      | 1.0000      | <empty>    |
| Temperature [C]               | -84.97      | 8.600       | <empty>    |
| Pressure [kPa]                | 500.0       | 500.0       | <empty>    |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 444.1       | 444.1       | <empty>    |
| Mass Flow [kg/h]              | 1.283e+004  | 1.283e+004  | <empty>    |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 14.78       | 14.78       | <empty>    |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -3257       | -522.1      | <empty>    |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 124.9       | 136.7       | <empty>    |
| Heat Flow [kJ/h]              | -1.447e+006 | -2.319e+005 | 1.215e+006 |

Figure V 34: Paramètre d'entrée-sortie du l'échangeur.

V.3.2.10 Le recycleur (RCY-1):

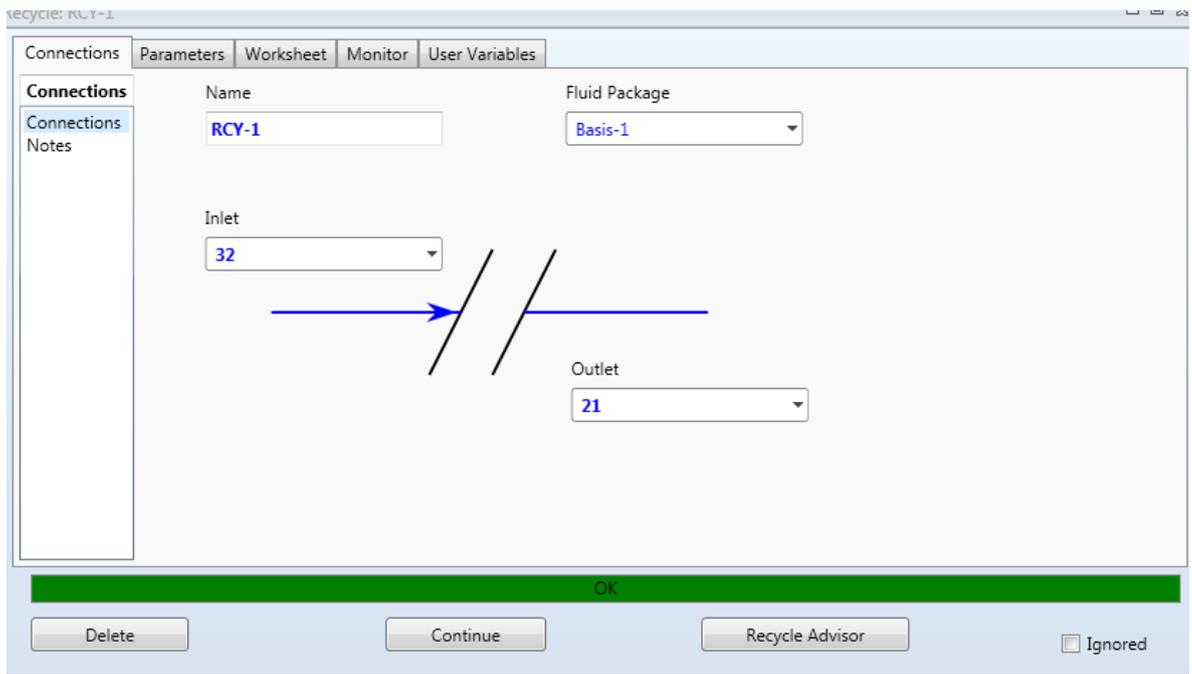


Figure V 35: Le recycleur.

|                               | 32          | 21          |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| Name                          | 32          | 21          |
| Vapour                        | 1.0000      | 1.0000      |
| Temperature [C]               | 8.600       | 8.600       |
| Pressure [kPa]                | 500.0       | 500.0       |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 444.1       | 444.1       |
| Mass Flow [kg/h]              | 1.283e+004  | 1.283e+004  |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 14.78       | 14.78       |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -522.1      | -522.1      |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 136.7       | 136.7       |
| Heat Flow [kJ/h]              | -2.319e+005 | -2.319e+005 |

Figure V 36: Paramètre d'entrée-sortie du recycleur.

### V.3.3 La distillation :

#### V.3.3.1 colonne de distillation (lower colonne T-100) :

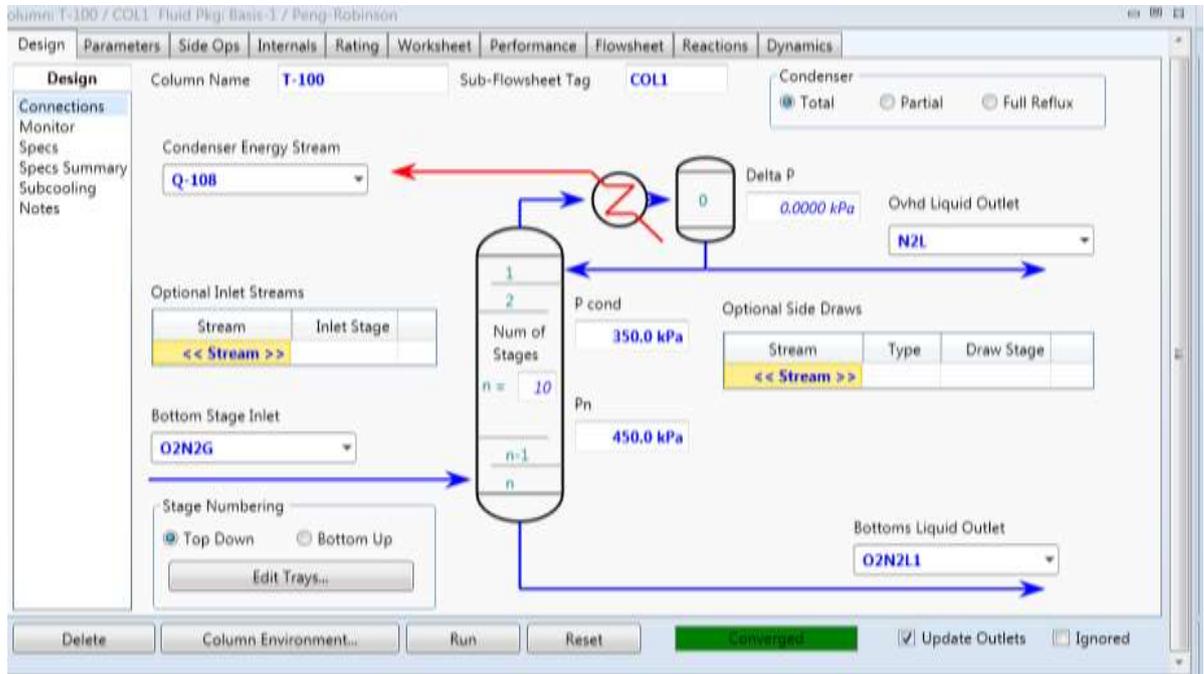


Figure V 37 : la colonne distillation.

| Name                          | 33 @COL1    | 16 @COL1    | 14 @COL1    |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Vapour                        | 1.0000      | 0.0000      | 0.0000      |
| Temperature [C]               | -85.53      | -183.4      | -175.2      |
| Pressure [kPa]                | 514.0       | 350.0       | 450.0       |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 444.1       | 250.0       | 194.2       |
| Mass Flow [kg/h]              | 1.283e+004  | 7006        | 5825        |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 14.78       | 8.677       | 6.105       |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -3276       | -1.124e+004 | -1.148e+004 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 124.6       | 45.76       | 51.12       |
| Heat Flow [kJ/h]              | -1.455e+006 | -2.809e+006 | -2.229e+006 |

Figure V 38: Paramètre d'entrée-sortie de la colonne distillation.

V.3.3.2 Le séparateur (TEE-102):

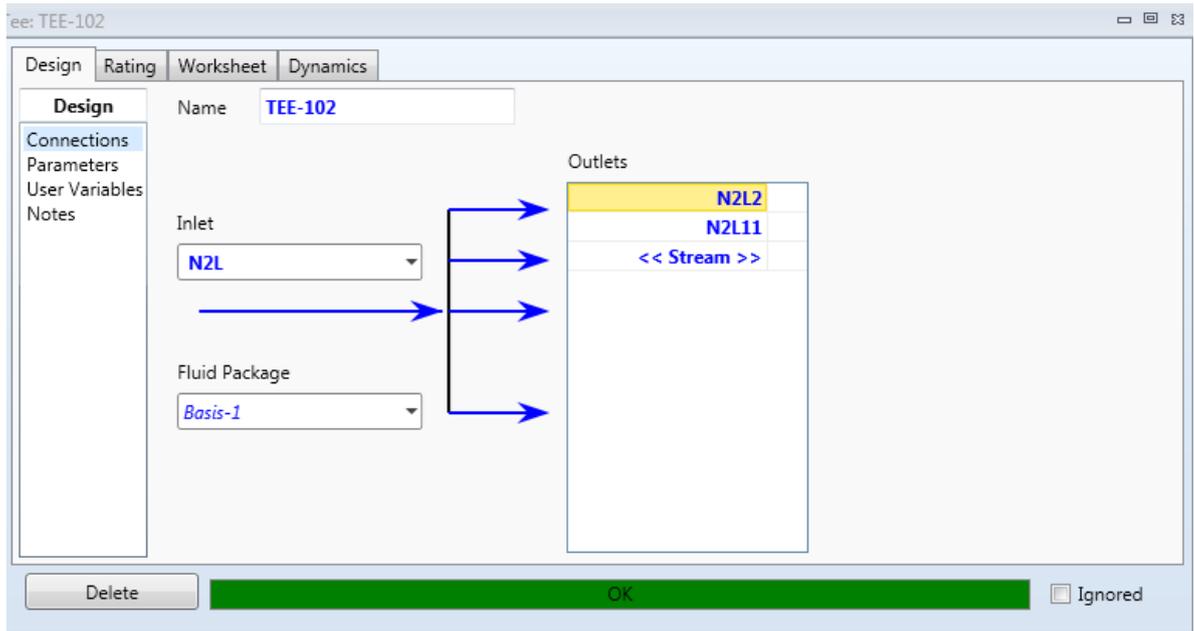


Figure V 39 : le séparateur.

The screenshot shows the 'Worksheet' tab for the TEE-102 separator. The table below displays the input and output parameters for the separator.

|                               | N2L         | N2L2        | N2L11       |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Name                          | N2L         | N2L2        | N2L11       |
| Vapour                        | 0.0000      | 0.0000      | 0.0000      |
| Temperature [C]               | -183.4      | -183.4      | -183.4      |
| Pressure [kPa]                | 350.0       | 350.0       | 350.0       |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 250.0       | 150.0       | 99.99       |
| Mass Flow [kg/h]              | 7006        | 4204        | 2803        |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 8.677       | 5.206       | 3.471       |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -1.124e+004 | -1.124e+004 | -1.124e+004 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 45.76       | 45.76       | 45.76       |
| Heat Flow [kJ/h]              | -2.809e+006 | -1.686e+006 | -1.124e+006 |

Figure V 40 : Paramètre d'entrée-sortie du séparateur.

V.3.3.3 La vanne joule Thomson (VLV-102):

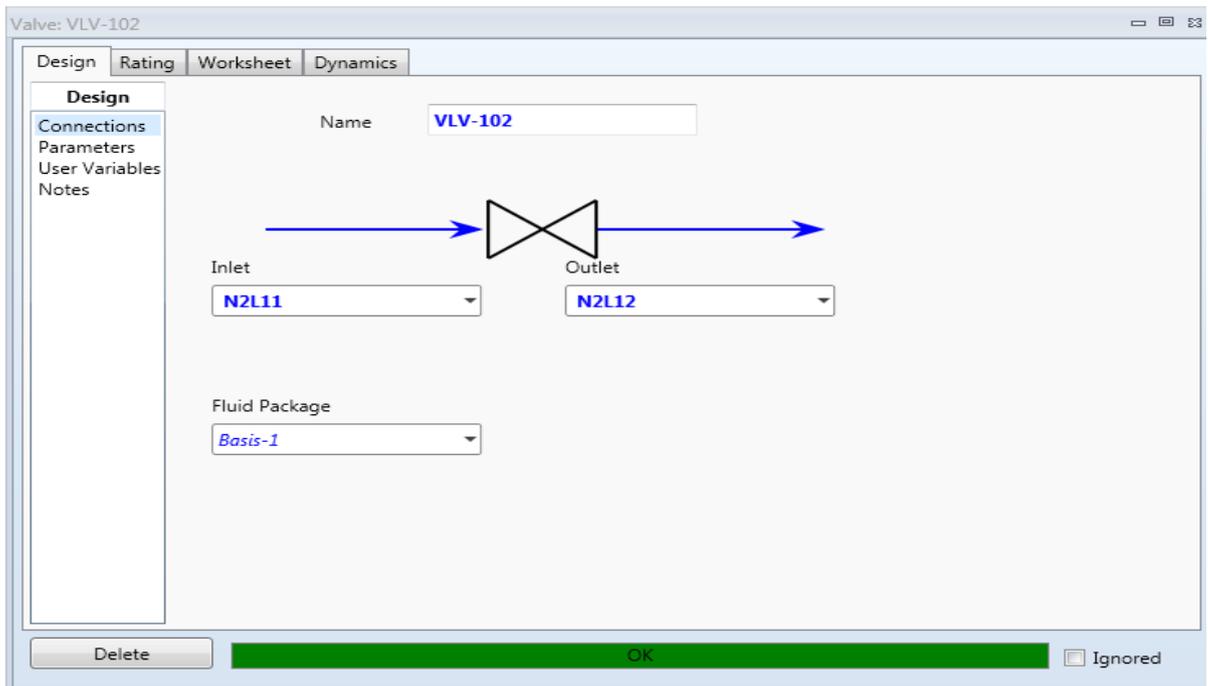


Figure V 41: la vanne de joule Thomson.

| Name                          | N2L11       | N2L12       |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| Vapour                        | 0.0000      | 0.1718      |
| Temperature [C]               | -183.4      | -201.3      |
| Pressure [kPa]                | 350.0       | 50.00       |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 99.99       | 99.99       |
| Mass Flow [kg/h]              | 2803        | 2803        |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 3.471       | 3.471       |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -1.124e+004 | -1.124e+004 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 45.76       | 47.38       |
| Heat Flow [kJ/h]              | -1.124e+006 | -1.124e+006 |

Figure V 42 : Paramètre d'entrée-sortie du vanne.

V.3.3.4 La vanne joule Thomson (VLV-100):

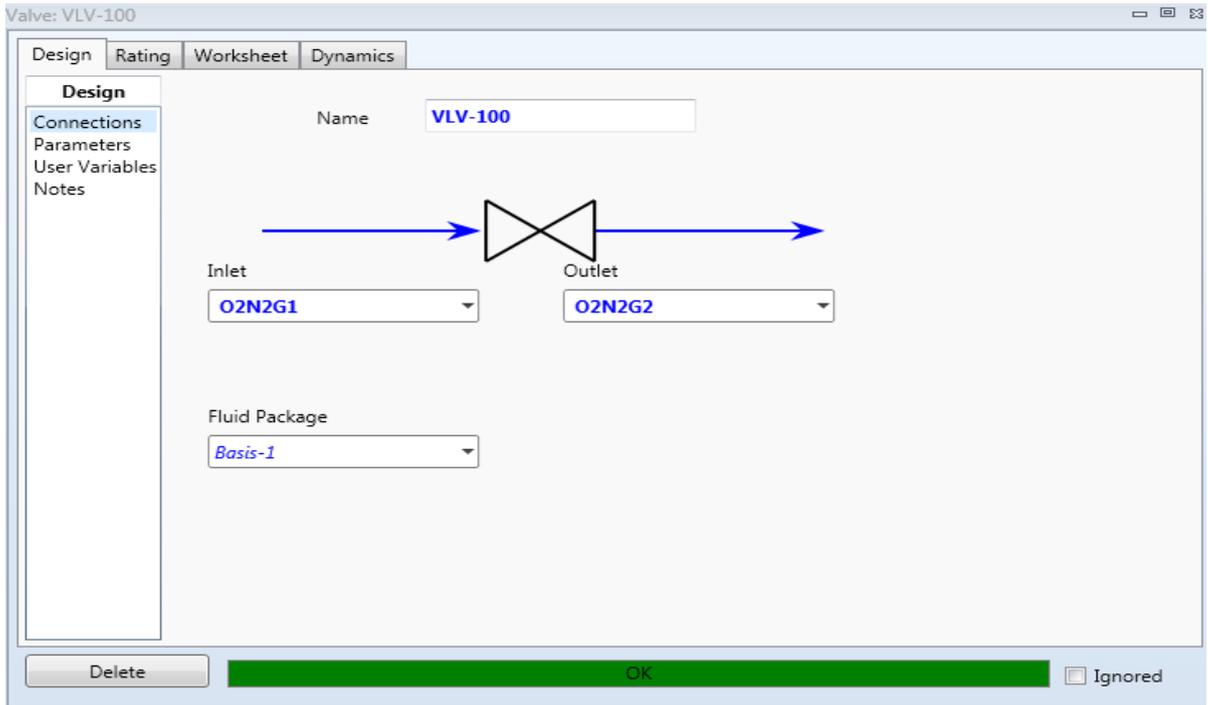


Figure V 43: La vanne joule Thomson.

The screenshot shows the 'Valve: VLV-100' configuration window in 'Worksheet' mode. The 'Worksheet' tab is active. The table below shows the parameters for the inlet and outlet streams.

| Name                          | O2N2G1      | O2N2G2      |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| Vapour                        | 1.0000      | 1.0000      |
| Temperature [C]               | -167.7      | -174.9      |
| Pressure [kPa]                | 500.0       | 50.00       |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 190.3       | 190.3       |
| Mass Flow [kg/h]              | 5499        | 5499        |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 6.335       | 6.335       |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -5721       | -5721       |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 107.7       | 126.0       |
| Heat Flow [kJ/h]              | -1.089e+006 | -1.089e+006 |

The window has a 'Delete' button on the left, a green 'OK' button in the center, and an 'Ignored' checkbox on the right.

Figure V 44: Paramètre d'entrée-sortie du vanne.

V.3.3.5 La vanne joule Thomson (VLV-101):

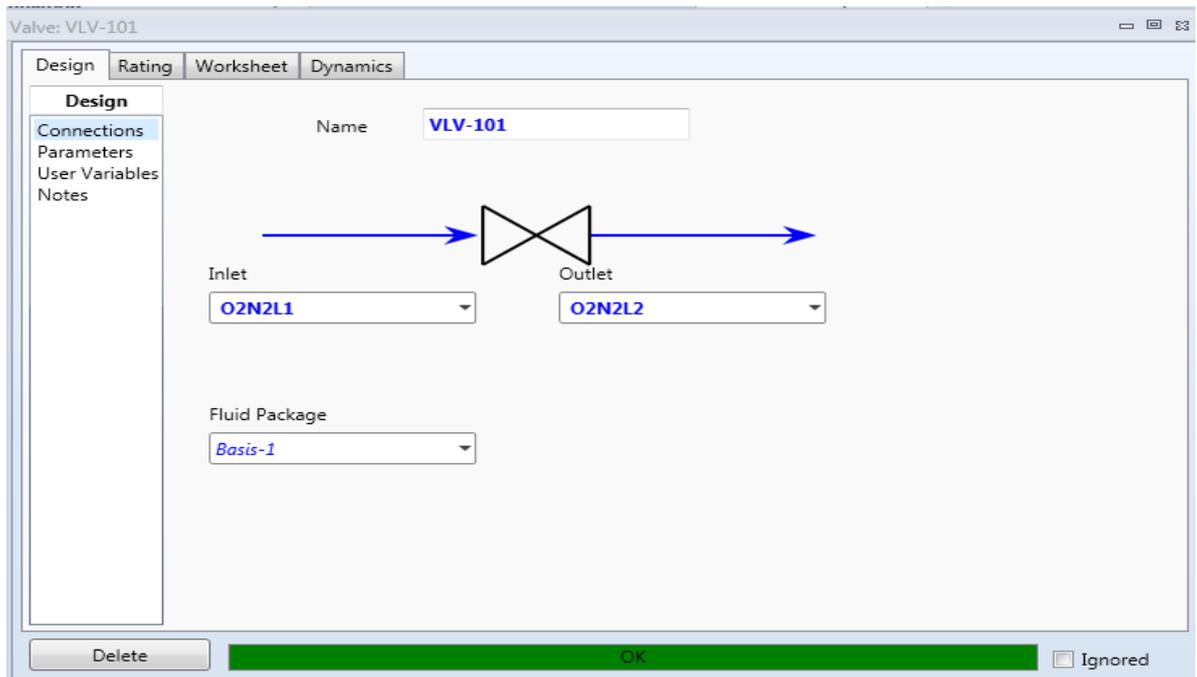


Figure V. 45 : La vanne joule Thomson.

|                               | O2N2L1      | O2N2L2      |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| Name                          | O2N2L1      | O2N2L2      |
| Vapour                        | 0.0000      | 0.1961      |
| Temperature [C]               | -175.2      | -197.1      |
| Pressure [kPa]                | 450.0       | 50.00       |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 194.2       | 194.2       |
| Mass Flow [kg/h]              | 5825        | 5825        |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 6.105       | 6.105       |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -1.148e+004 | -1.148e+004 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 51.12       | 53.20       |
| Heat Flow [kJ/h]              | -2.229e+006 | -2.229e+006 |

Figure V 46: Paramètre d'entrée-sortie du vanne.

V.3.3.6 colonne de distillation (uper colonne T-102) :

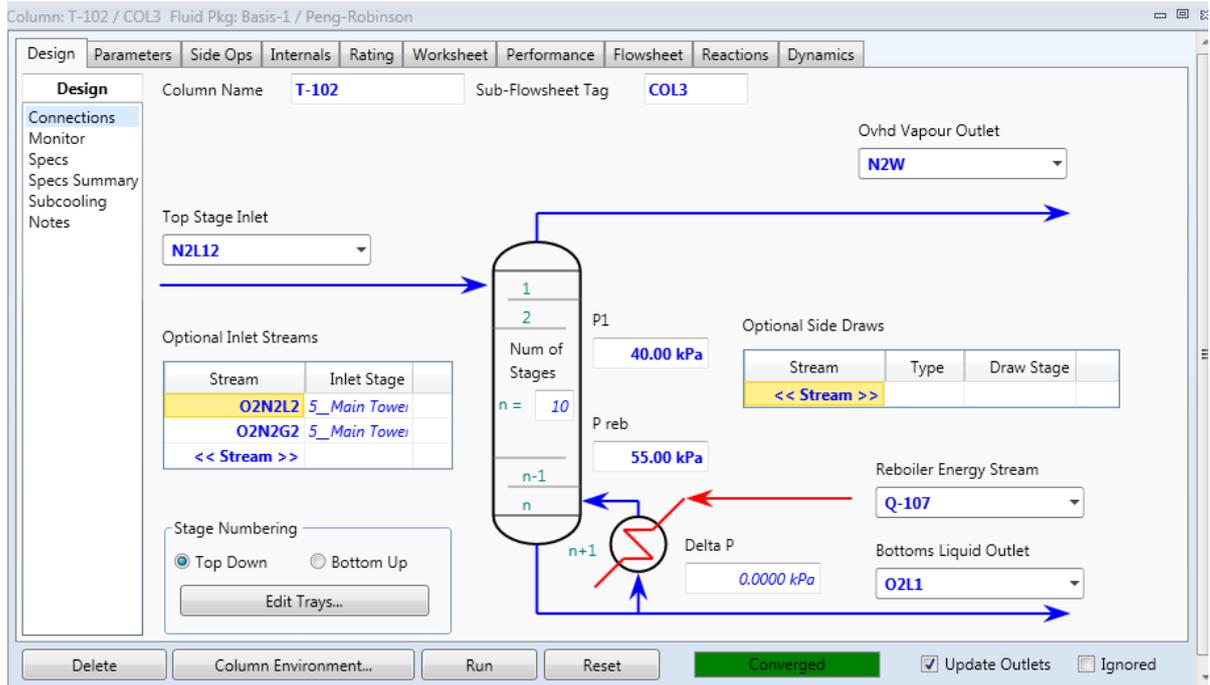


Figure V 47: colonne de distillation T-102

| Name                          | 22 @COL3    | 15 @COL3    | 13 @COL3    | 20 @COL3    | 18 @COL3    |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Vapour                        | 0.1718      | 0.1961      | 1.0000      | 1.0000      | 0.0000      |
| Temperature [C]               | -201.3      | -197.1      | -174.9      | -200.0      | -188.8      |
| Pressure [kPa]                | 50.00       | 50.00       | 50.00       | 40.00       | 55.00       |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 99.99       | 194.2       | 190.3       | 400.0       | 84.49       |
| Mass Flow [kg/h]              | 2803        | 5825        | 5499        | 1.142e+004  | 2703        |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 3.471       | 6.105       | 6.335       | 13.53       | 2.378       |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -1.124e+004 | -1.148e+004 | -5721       | -6431       | -1.293e+004 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 47.38       | 53.20       | 126.0       | 118.7       | 33.18       |
| Heat Flow [kJ/h]              | -1.124e+006 | -2.229e+006 | -1.089e+006 | -2.572e+006 | -1.093e+006 |

Figure V 48: Paramètre d'entrée-sortie de la colonne distillation.

V.4 Schéma globale :

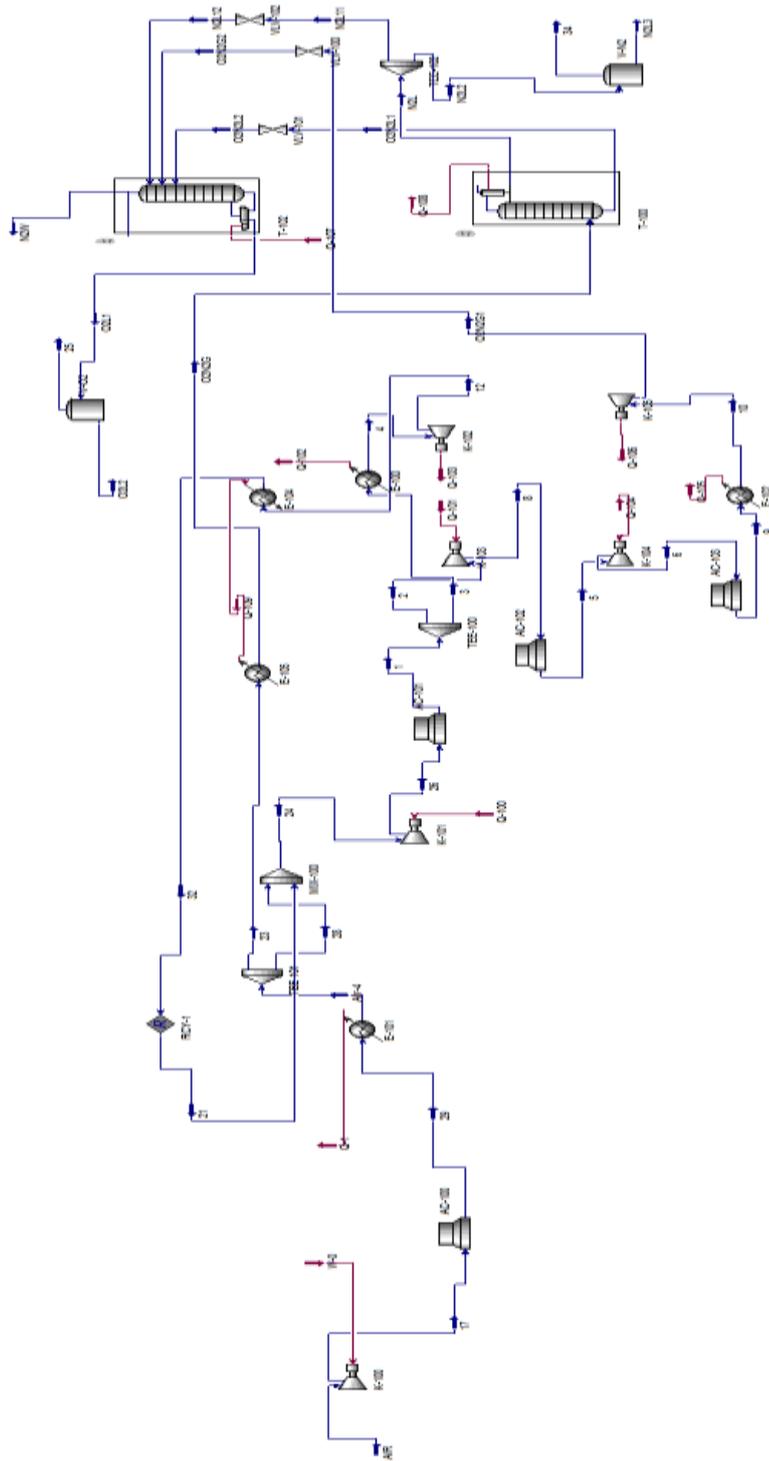


Figure V.49: Schéma globale de production d'oxygène.

**Tableau V. 1: Résultat de simulation pour le cycle de liquéfaction et séparation de l'air.**

|                    | Unit     | Air-4     | N2L12     | O2N2L2    | O2L1      | N2W       | O2N2L1    | N2L       | 23        | O2N2G2    | N2L2      |
|--------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Vapour Fraction    |          | 1         | 0.1718    | 0.1961    | 0         | 1         | 0         | 0         | 1         | 1         | 0         |
| Temperature        | C        | 8         | -201.3    | -197.1    | -188.8    | -200      | -175.2    | -183.4    | 8         | -174.9    | 183.4     |
| Pressure           | kPa      | 5140      | 5000      | 5000      | 5500      | 4000      | 4500      | 3500      | 5140      | 5000      | 3500      |
| Molar Flow         | kgmole/h | 634.5     | 99.99     | 194.2     | 84.49     | 400       | 194.2     | 250       | 444.1     | 190.3     | 150       |
| Mass Flow          | kg/h     | 1.83E+04  | 2803      | 5825      | 2703      | 1.14E+04  | 5825      | 7006      | 1.28E+04  | 5499      | 4204      |
| Liquid Volume Flow | m3/h     | 21.12     | 3.471     | 6.106     | 2.378     | 13.53     | 6.105     | 8.677     | 14.78     | 6.335     | 5.206     |
| Heat Flow          | kJ/h     | -3.43E+00 | -1.12E+00 | -2.23E+00 | 1.09E+00  | 2.57E+00  | -2.23E+00 | -2.81E+00 | -2.40E+00 | -1.09E+00 | -1.69E+00 |
|                    | Unit     | 28        | 17        | 29        | AIR       | 24        | 26        | 1         | 3         | 4         | 2         |
| Vapour Fraction    |          | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Temperature        | C        | 8         | 267.1     | 32        | 32        | 8.407     | 192.6     | 35.5      | 35.5      | -19       | 35.5      |
| Pressure           | kPa      | 5140      | 5140      | 5140      | 1000      | 5000      | 2064      | 2064      | 2064      | 2015      | 2064      |
| Molar Flow         | kgmole/h | 190.3     | 634.5     | 634.5     | 634.5     | 634.5     | 634.5     | 634.5     | 444.1     | 444.1     | 190.3     |
| Mass Flow          | kg/h     | 5499      | 1.83E+04  | 5499      |
| Liquid Volume Flow | m3/h     | 6.335     | 21.12     | 21.12     | 21.12     | 21.12     | 21.12     | 21.12     | 14.78     | 14.78     | 6.335     |
| Heat Flow          | kJ/h     | 1.03E+00  | 4.59E+00  | 1.05E+00  | 1.25E+00  | -3.35E+00 | 3.12E+00  | 9.83E+00  | 6.89E+00  | -6.63E+00 | 2.95E+00  |
|                    | Unit     | 5         | 6         | 9         | 10        | O2N2G1    | 12        | 32        | O2N2G     | 21        | 25        |
| Vapour Fraction    |          | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 0         |
| Temperature        | C        | 25.89     | 56.79     | 34        | -109      | -167.7    | -84.97    | 8.5       | -85.53    | 8.6       | 0         |
| Pressure           | kPa      | 2590      | 3368      | 3368      | 3368      | 5000      | 5000      | 5000      | 5140      | 5000      | 0         |
| Molar Flow         | kgmole/h | 190.3     | 190.3     | 190.3     | 190.3     | 190.3     | 444.1     | 444.1     | 444.1     | 444.1     | 0         |
| Mass Flow          | kg/h     | 5499      | 5499      | 5499      | 5499      | 5499      | 1.28E+04  | 1.28E+04  | 1.28E+04  | 1.28E+04  | 0         |
| Liquid Volume Flow | m3/h     | 6.335     | 6.335     | 6.335     | 6.335     | 6.335     | 14.78     | 14.78     | 14.78     | 14.78     | 0         |
| Heat Flow          | kJ/h     | -3.34E+00 | 1.37E+00  | 3449      | -3.91E+00 | -1.09E+00 | -1.45E+00 | -2.32E+00 | -1.46E+00 | -2.32E+00 | 0         |
|                    | Unit     | 34        | N2L3      | N2L11     | 8         | O2L2      |           |           |           |           |           |

|                    |          |        |          |         |         |          |  |  |  |  |
|--------------------|----------|--------|----------|---------|---------|----------|--|--|--|--|
| Vapour Fraction    |          | 1      | 0        | 0       | 1       | 0        |  |  |  |  |
| Temperature        | C        | -183.4 | -183.4   | -183.4  | 62.89   | -188.8   |  |  |  |  |
| Pressure           | kPa      | 3500   | 3500     | 3500    | 2580    | 5500     |  |  |  |  |
| Molar Flow         | kgmole/h | 0      | 1500     | 99.99   | 190.3   | 84.49    |  |  |  |  |
| Mass Flow          | kg/h     | 0      | 4204     | 2803    | 5499    | 2703     |  |  |  |  |
| Liquid Volume Flow | m3/h     | 0      | 5.206    | 3.471   | 6.335   | 2.378    |  |  |  |  |
| Heat Flow          | kJ/h     | 0      | -1.69E+0 | 1.12E+0 | 1.81E+0 | -1.09E+0 |  |  |  |  |

### V.5.Calcul des bilans énergétiques:

La consommation d'énergie électrique de process:

**Tableau V. 2 : La consommation d'énergie électrique .**

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| <b>Le compresseur (MAC)</b> | <b>1250 Kw</b> |
| <b>Le compresseur (RAC)</b> | <b>960 Kw</b>  |
| <b>Total</b>                | <b>2210 Kw</b> |

**Tableau V. 3 : Production de l'unité.**

|                |                  |
|----------------|------------------|
| <b>Oxygène</b> | <b>2.700 T/h</b> |
| <b>Azote</b>   | <b>4.200 T/h</b> |
| <b>Total</b>   | <b>6.900 T/h</b> |

Le prix de revient du produit final

$$x = \frac{2210 \text{ Kw}}{6900 \text{ T/h}} = 0.32 \text{ Kw.h/kg}$$

$$\text{Prix} = 0.32 \times 10 \text{ DA} = 3.2 \text{ DA/kg}$$

### **V.5.1.Discussion des résultats de simulation :**

La simulation présente des résultats très proche des conditions de production de l'usine le jour de stage .et le relevé des données opérationnel.

La simulation HYSYS nous donné une production d'oxygène de 2.7 T/h.

Alors l'unité présente un capacité de production on voisinage 3 T/h.

V.5.2. Suggestion pour améliorer le processus de production d' $O_2$  en utilisant  $N_2$

WEST:

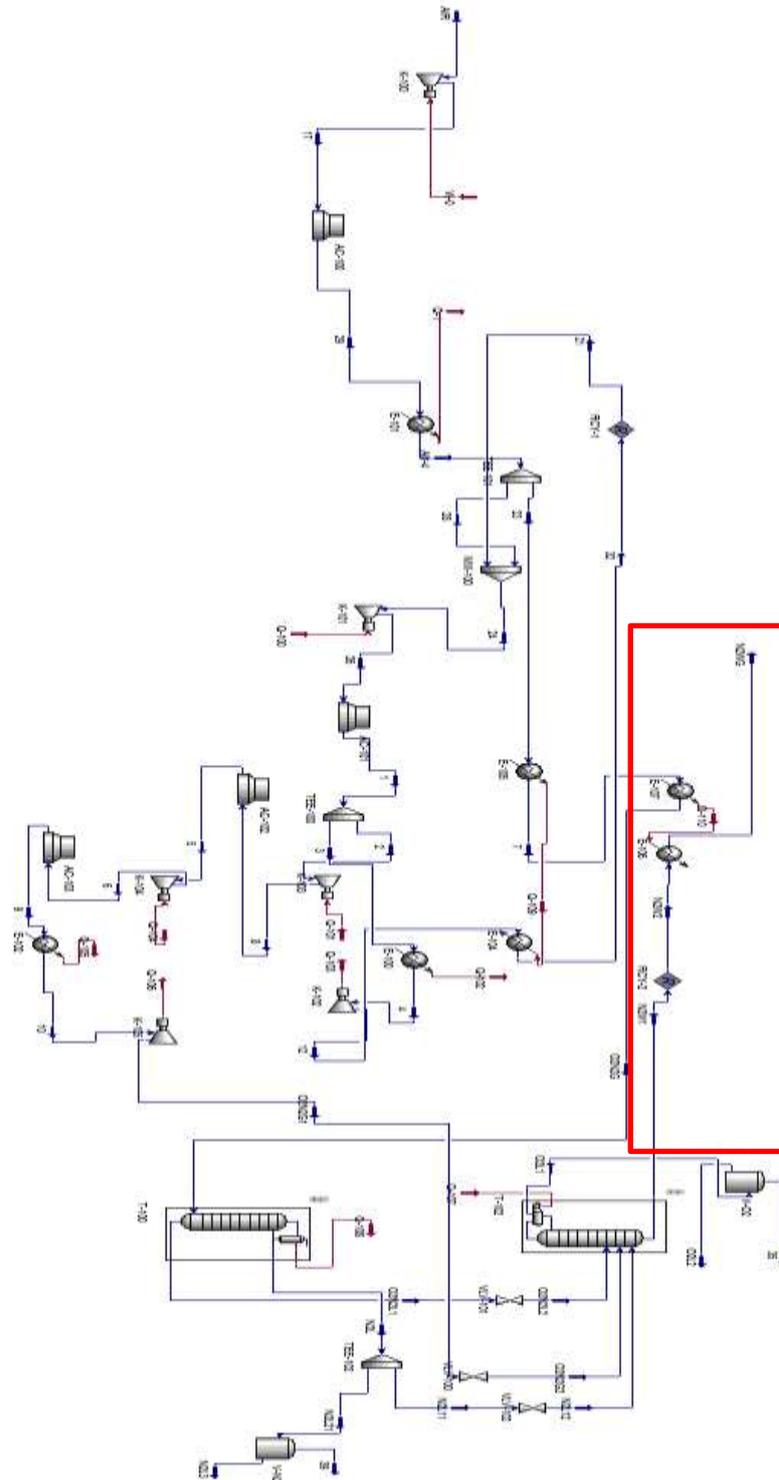


Figure V.51: Schéma globale de la Proposition de production d'oxygène.

**Tableau V. 4 : Résultat de simulation pour le cycle de liquéfaction et séparation de l'air.**

|                    | Unit         | Air-4           | N2L12           | O2N2L<br>2      | O2L1            | N2W1            | O2N2L<br>1      | N2L             | 23              | O2N2G<br>2      | N2L21           |
|--------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Vapour Fraction    |              | 1               | 0.17163<br>9479 | 0.19759<br>2754 | 0               | 1               | 1.28E-<br>05    | 1.43E-<br>05    | 1               | 1               | 1.43E-<br>05    |
| Temperature        | C            | 8               | 201.168<br>4105 | 197.840<br>1161 | 188.682<br>0485 | 198.220<br>9222 | 176.096<br>3139 | 183.197<br>582  | 8               | 174.938<br>3987 | 183.197<br>582  |
| Pressure           | kPa          | 514             | 50              | 50              | 55              | 40              | 450             | 350             | 514             | 50              | 350             |
| Molar Flow         | kgmol<br>e/h | 634.469<br>528  | 50.0020<br>3465 | 225.841<br>9721 | 34.4615<br>8473 | 399.999<br>8041 | 225.841<br>9721 | 250.010<br>1732 | 475.852<br>146  | 158.617<br>382  | 200.008<br>1386 |
| Mass Flow          | kg/h         | 18329.9<br>1373 | 1406.78<br>4824 | 6713.51<br>1161 | 1102.74<br>9521 | 11600.0<br>249  | 6713.51<br>1161 | 7033.92<br>412  | 13747.4<br>353  | 4582.47<br>8433 | 5627.13<br>9296 |
| Liquid Volume Flow | m3/h         | 21.1181<br>9932 | 1.72696<br>4389 | 7.20382<br>7523 | 0.96935<br>0467 | 13.2409<br>9128 | 7.20382<br>7523 | 8.63482<br>1947 | 15.8386<br>4949 | 5.27954<br>983  | 6.90785<br>7557 |
| Heat Flow          | kJ/h         | 343240.<br>3309 | 563127.<br>8953 | 2580770<br>.154 | 445602.<br>7328 | 2546824<br>.926 | 2580770<br>.154 | 2815639<br>.476 | 257430.<br>2481 | 907399.<br>1182 | 2252511<br>.581 |
|                    | Unit         | N2L11           | 28              | 17              | 29              | AIR             | 24              | 26              | 1               | 3               | 4               |
| Vapour Fraction    |              | 1.43E-<br>05    | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| Temperature        | C            | 183.197<br>582  | 8               | 267.147<br>2832 | 32              | 32              | 8.21428<br>9212 | 192.245<br>9227 | 35.5            | 35.5            | -19             |
| Pressure           | kPa          | 350             | 514             | 514             | 514             | 100             | 500             | 2064            | 2064            | 2064            | 2015            |
| Molar Flow         | kgmol<br>e/h | 50.0020<br>3465 | 158.617<br>382  | 634.469<br>528  | 634.469<br>528  | 634.469<br>528  | 264.362<br>3033 | 264.362<br>3033 | 264.362<br>3033 | 105.744<br>9213 | 105.744<br>9213 |
| Mass Flow          | kg/h         | 1406.78<br>4824 | 4582.47<br>8433 | 18329.9<br>1373 | 18329.9<br>1373 | 18329.9<br>1373 | 7637.46<br>4054 | 7637.46<br>4054 | 7637.46<br>4054 | 3054.98<br>5622 | 3054.98<br>5622 |
| Liquid Volume Flow | m3/h         | 1.72696<br>4389 | 5.27954<br>983  | 21.1181<br>9932 | 21.1181<br>9932 | 21.1181<br>9932 | 8.79924<br>9717 | 8.79924<br>9717 | 8.79924<br>9717 | 3.51969<br>9887 | 3.51969<br>9887 |
| Heat Flow          | kJ/h         | 563127.<br>8953 | 85810.0<br>8271 | 4589893<br>.651 | 104494.<br>9257 | 124637.<br>1633 | 141021.<br>7808 | 1298364<br>.739 | 40994.1<br>8906 | 16397.6<br>7562 | 157898.<br>649  |
|                    | Unit         | 2               | 8               | 5               | 6               | 9               | 10              | O2N2G<br>1      | 12              | 32              | O2N2G           |
| Vapour Fraction    |              | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| Temperature        | C            | 35.5            | 62.8891<br>9142 | 25.89           | 56.7877<br>1969 | 34              | -109            | 167.661<br>3637 | 84.9734<br>3362 | 8.6             | 172.687<br>1366 |
| Pressure           | kPa          | 2064            | 2590            | 2590            | 3368            | 3368            | 3368            | 500             | 500             | 500             | 514             |
| Molar Flow         | kgmol<br>e/h | 158.617<br>382  | 105.744<br>9213 | 105.744<br>9213 | 475.852<br>146  |
| Mass Flow          | kg/h         | 4582.47<br>8433 | 3054.98<br>5622 | 3054.98<br>5622 | 13747.4<br>353  |
| Liquid Volume Flow | m3/h         | 5.27954<br>983  | 3.51969<br>9887 | 3.51969<br>9887 | 15.8386<br>4949 |
| Heat Flow          | kJ/h         | 24596.5<br>1343 | 151061.<br>2539 | 27795.7<br>9119 | 114269.<br>3899 | 2874.17<br>608  | 742396.<br>5982 | 907399.<br>1182 | 344448.<br>3888 | 55211.6<br>9811 | 2801447<br>.34  |
|                    | Unit         | 21              | N2W2            | 7               | N2WG            | 35              | O2L2            | N2L3            | 39              |                 |                 |
| Vapour Fraction    |              | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 0               | 0               | 1               |                 |                 |
| Temperature        | C            | 8.6             | 198.232<br>2466 | 12.7324<br>532  | 0               | 188.682<br>0485 | 188.682<br>0485 | 183.197<br>582  | 183.197<br>582  |                 |                 |
| Pressure           | kPa          | 500             | 40              | 514             | 40              | 55              | 55              | 350             | 350             |                 |                 |
| Molar Flow         | kgmol<br>e/h | 105.744<br>9213 | 399.993<br>8573 | 475.852<br>146  | 399.993<br>8573 | 0               | 34.4615<br>8473 | 200.005<br>2714 | 0.00286<br>7176 |                 |                 |
| Mass Flow          | kg/h         | 3054.98<br>5622 | 11598.6<br>0511 | 13747.4<br>353  | 11598.6<br>0511 | 0               | 1102.74<br>9521 | 5627.05<br>8848 | 0.08044<br>8232 |                 |                 |

|                    |                        |                 |                 |                 |                 |   |                 |                 |                 |  |  |
|--------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|--|--|
| Liquid Volume Flow | <i>m<sup>3</sup>/h</i> | 3.51969<br>9887 | 13.2428<br>63   | 15.8386<br>4949 | 13.2428<br>63   | 0 | 0.96935<br>0467 | 6.90775<br>8169 | 9.94E-<br>05    |  |  |
| Heat Flow          | <i>kJ/h</i>            | 55211.6<br>9811 | 2546951<br>.943 | 546666.<br>9388 | 292171.<br>5423 | 0 | 445602.<br>7328 | 2252493<br>.968 | 17.6131<br>0002 |  |  |

**Figure V.52: Résultat de simulation pour le cycle de liquéfaction et séparation de l'air.**

La consommations un énergie électriques de process:

**Tableau V. 5 : La consommation d'énergie électrique.**

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| <b>Le compresseur (MAC)</b> | <b>400 Kw</b>  |
| <b>Le compresseur (RAC)</b> | <b>1240 Kw</b> |
| <b>Total</b>                | <b>1640 Kw</b> |

Production de l'unité:

**Tableau V.6 : Production de l'unité.**

|                |                  |
|----------------|------------------|
| <b>Oxygène</b> | <b>1.100 T/h</b> |
| <b>Azote</b>   | <b>5.600 T/h</b> |
| <b>Total</b>   | <b>6.700 T/h</b> |

### V.5.3. Remarque:

Après la production d'oxygène, nous avons remarqué qu'une grande quantité d'énergie était consommée.

Nous avons donc utilisé l'azote perdu lors de son exploitation pour réduire la quantité d'énergie consommée, et les résultats ont été :

- Une diminution significative de la quantité d'énergie consommée pour compresseur MAC.
- Une légère augmentation de la quantité d'énergie consommée pour compresseur RAC.
- Une diminution de la production d'oxygène jusqu'à 1,1 t/h .

Notre objectif en utilisant l'azote est de réduire la quantité d'énergie consommée.

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion général

---

### Conclusion générale:

Ce travail nous à permet de faire un stage pratique dans l'unité de production de l'oxygène liquide de Laghouat.

Notre travail consiste à rassembler les données de l'unité et de faire reproduire le processus sur le logiciel du HYSYS.

La version 11 à utiliser et nous a donner des résultats en tant que capacité de production horaire.

Cette nous à permet de bien maitriser la logiciel très puissant dans le domaine de génie de procédés.

S'affinant sur notre simulation on a proposé une amélioration du processus en recyclant les gaz d'azote perdu dans la colonne haute pour le refroidissement d'apport d'air.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIES**

## Références Bibliographiques

---

- [1]: Bulletin de l'institut international du froid 2003-6, La cryogénie, clé de la science et de la technologie avancées par Philippe Lebrun.
- [2]: Adapted from who Interim guidance on Oxygen sources and distribution for COVID-19 treatment centers. 4 April 2020. <https://www.who.int/publications-detail/oxygen-sources-and-distribution-for-covid-19-treatment-centres>
- [3]: <https://www.gavi.org/vaccineswork/what-steps-must-be-taken-secure-oxygen-covid-19-patients-and-future>
- [4]: Coronavirus disease (COVID-19) technical guidance: COVID-19 critical items. On who.int [website]. Geneva: World Health Organization; 2020.
- [5]: WHO-UNICEF technical specifications and guidance for oxygen therapy devices; who medical device technical series; Geneva: World Health Organization and United Nations Children's Fund (UNICEF); 2019  
([https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/329874/9789241516914\\_eng.pdf?ua=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/329874/9789241516914_eng.pdf?ua=1)).
- [6]: BOUDAA Dyhia et GACI Soumia mémoire fin d'étude etude et simulation d'une installation de liquéfaction et separation des gaz de l'air 2017
- [7]: CAILLETET, L, C, R : Acad. SCI PARIS, 85,1213 (1877)
- [8]: PICTET, R, C, R. Acad. Sci PARIS, 85,1214 (1877).
- [9]: LISZEWSKIK, Phil, mag, 39,188 (1895).
- [10]: DEWAR, j, proc.roy.soc, 63,256 (1898).
- [11] : DEWAR j, Collected papers of sir. J. Dewar, Cambridge university press (1927).
- [12]: kamellingh-onnes, h ; proc.acad.sci. amsr,11,168 (1908).
- [13]: kamellingh-onnes, h ; com,phys.lab. univ. leiden,119,120,122 (1911).
- [14]: London, H ; Proc.Int.Conf.Low Temp.physocs, 157 oxfords (1951).
- [15]: Giauque,w:f,j Am.chem.Soc ,49 (1927).
- [16]: Mendelssohn.k, The Quest for absolute zero,mac,graw hill book (1966).

## Références Bibliographiques

---

- [17]: Daunt, J. G., encyclopedia of physics, 14 (1956).
- [18]: Collins, S., encyclopedia of physics, 14, 112 (1956).
- [19]: Conte, R. R. éléments de cryogénie. ed. Masson, Paris (1970).
- [20]: Julien Bobroff, Thermodynamique Classique Magistère de Physique d'Orsay, 2008.
- [21]: Randall F. Barron-cryogenic Systems Oxford University Press, New York, Clarendon Press
- [22]: Djelloul Amel, mémoire de fin de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène 2006
- [23]: technique de l'ingénieur en cryogénie : mise en œuvre des basses températures par Jean-Claude Boissin.
- [24]: Yunus A. Cengel, Michael A. Boles McGraw-Hill, thermodynamics: An Engineering approach, 7th Edition 2011.
- [25]: G. Perinic, G. Vandoni, T. Niinikoski, CERN, Introduction to cryogenic engineering 9.12.2005
- [26]: le site web <http://french.airseparation-plant.com/sale-1826837-industrial-cryogenic-air-separation-unit-equipment-1000kw-for-oxygen-generatin.html>.
- [27]: P. Bredy Introduction à la cryogénie et à la supraconductivité Fluides cryogéniques L'état pdf [philippe.bredy@cea.fr](mailto:philippe.bredy@cea.fr)
- [28]: le site web [www.westfalen.ch](http://www.westfalen.ch), [info@westfalen.ch](mailto:info@westfalen.ch)
- [29]: le site web <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-oxygene-798/>
- [30]: le site web <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/oxyg%C3%A8ne/75929>
- [31]: Compressed Gas Association (CGA) [www.cganet.com](http://www.cganet.com)  
European Industrial Gas Association (EIGA) [www.eiga.org](http://www.eiga.org)  
Asia Industrial Gas Association (AIGA) [www.asiaiga.org](http://www.asiaiga.org)  
American Chemistry Council (ACC) [www.americanchemistry.com](http://www.americanchemistry.com)
- [32]: website : [www.airliquidehomecare.co.uk](http://www.airliquidehomecare.co.uk)

## Références Bibliographiques

---

- [33] : le site web [www.jinhong-gas.ne](http://www.jinhong-gas.ne)
- [34] :le site web <https://elearning-deprecated.univ-annaba.dz/>
- [35]: mémoire Air Séparation No. SAMRS 2009/09/02 Bratislava 2010 fait par sherry shah Amarkhalil
- [36] : Air séparation techniques course by Anders Lenneskog, Cryogenic plants. Version 8 june 2007.
- [37] : technique de l'ingénieure Séparation et liquéfaction des gaz par pierre petit.
- [38] : Trupti Ambar, Tyagee Chavan, Manali Kavale and S M Walke, “ Simulation of Process Equipment by using
- [39]: Rhodes C.L., “The Process Simulation Revolution: Thermophysical Property Needs and Concerns”, J.Chem.Eng.Data, 41, 947-950, 1996
- [40]: J. Banks, J. Carson, B. Nelson, D, “ Nicol Discrete-Event System Simulation”, Prentice Hall. p. 3. ISBN 0- 13-088702-1, 2001.
- [41]: Sokolowski, J.A., Banks, C.M., “Principles of Modeling and Simulation” Hoboken, NJ: Wiley.p. 6. ISBN 978-0-470-28943-3, 2009
- [42]: Availabe at Operation Guide, HYSYS 3.2, 2003
- [43]: available at [http://en.wikipedia.org/wiki/Process\\_simulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Process_simulation) & <http://www.globalsim.com/>
- [44]: Aspen Hysys@ 2004.2 Dynamic Modeling.Issues addresses by Process Modeling (Aspen Hysys) V7.2 Cumulative patch 2, September 2010
- [45]: Seader, J.D., Seider, W.D. and Pauls, “A.C.: Flowtran Simulation - An Introduction, 2nd Edition”, CACHE 1977.
- [46]: K. Hing Pang, “A Novel Use of HYSYS to Design an Industrial Refrigeration System”, California Polytechnic University, Pomona Bucknell university Lewisburg PA 17837 December 15 2007
- [47]: Available at <http://www.aspentech.com/aspen-hysys-midstream.aspx>