

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGÉNIEURAT
DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie des Procédés

Spécialités : génie chimie

THEME

ETUDE VERIFICATIVE DES SYSTÈMES DE
REFROIDISSEMENT DE L'UNITÉ N°3 DE LA
CENTRALE À OXYGÈNE DU COMPLEXE
SIDÉRURGIQUE D'EL-HADJAR

Présenté par :
Saifi Salah

Encadré par :
Ms. Iachgar

Année Universitaire : 2016/2017

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGÉNIEURAT
DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie des Procédés

Spécialités : génie chimie

THEME

ETUDE VERIFICATIVE DES SYSTÈMES DE
REFROIDISSEMENT DE L'UNITÉ N°3 DE LA
CENTRALE À OXYGÈNE DU COMPLEXE
SIDÉRURGIQUE D'EL-HADJAR

Présenté par :
Saifi Salah

Encadré par :
Ms. Iachgar

Année Universitaire : 2016/2017

REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné la santé, la volonté et le courage pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à mon directeur de mémoire : Pr: **Mr. Lachgar** pour ses encouragements, ses conseils, ainsi que la mise en disposition de tous les moyens dont il dispose.

Je remercie également les membres de jury, président et examinateur, d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

J'ai le grand honneur et l'immense plaisir de transmettre mes plus vifs remerciements aux tous nos professeurs, <<particulièrement à Pr : Mr **.Hamdaoui Oualid**, Pr : **Mr. Samar**, et notre chef de département Dr : **Saoudi Fethi**>> qui ont contribué tous à nous transmettre l'incalculable trésor qui est le savoir.

Un remerciement pour Mr **Bourasse Bachir** ingénieur à la COX, le chef d'unité Mr **Chaker** et pour toute l'équipe de l'unité pour tout aide qu'ils nous ont fourni.

Il est également agréable de remercier tous ceux que je n'ai pas cités, et qui m'ont aidés de près ou de loin, reçoivent mes sincères remerciements.

En fin, vivement mes vifs remerciements à mes amis **valid** et **Monder**.

S. Saifi

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail, comme un geste de gratitude :

A celle qui m'a enfanté dans la douleur et de la joie, mon symbole d'amour :

Ma très chère mère

A celui qui est cher et j'apprécie fort son soutien continu tout le long de mes études :

Mon très cher père

A ceux qui m'ont encouragé: mes frères (Ahmed & Ali) mes sœurs ainsi que toute ma famille et amis

;

;

;

A la fin je dédie ce mémoire à ma future femme (G.c.y)

S. Saifi

Sommaire

Nomenclature

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale

Chapitre I : Généralités

| | |
|---|----|
| I.1 Historique et presentation..... | 15 |
| I.2 Les Marchés des produits..... | 18 |
| I.3 Généralités sur l'air..... | 18 |
| I.4 Généralités sur les composants de l'air (l'oxygène et azote)..... | 19 |
| I.5 Utilisation industrielle, Stockage et le transport..... | 23 |
| I.6 Risque liés à la production des gaz de la COX | 24 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction..... | 26 |
| II.2 Séparation de l'air..... | 26 |
| II.3 Production d'argon..... | 32 |
| II.4 Stockage des produits..... | 33 |
| II.5 Généralités sur l'épuration..... | 33 |
| II.6 Notion de l'adsorption..... | 35 |
| II.7 Procédé de distillation de l'air..... | 37 |
| II.8 Tamis moléculaire..... | 41 |

Chapitre III

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction..... | 46 |
| III.2 Calcul des débits de refroidissement de l'air du procédé | 46 |
| III.3 Calcul du débit d'azote de la colonne de refroidissement..... | 47 |
| III.4 Calcul des débits d'eau de refroidissement au niveau de la colonne de lavage..... | 49 |
| III.5 Calcul sur l'Aéro-Réfrigérant au niveau de la centrale | 60 |

NOMENCLATURE

P_v : pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air.

P''_v : pression partielle de vapeur saturante.

L_0 : débit d'eau à l'entrée de la colonne de refroidissement [Kg/h].

L_1 : débit d'eau à la sortie de la colonne de refroidissement [Kg/h].

G_s : débit d'azote sec [Kg/h].

H_0 : enthalpie de l'eau à l'entrée de la colonne de refroidissement [kcal/Kg d'eau].

H_1 : enthalpie de l'eau à la sortie de la colonne de refroidissement [kcal/Kg d'eau].

H_{G0} : enthalpie de l'azote à l'entrée de la colonne de refroidissement [kcal/Kg d'azote].

H_{G1} : enthalpie de l'azote à la sortie de la colonne de refroidissement [kcal/Kg d'azote].

L_1 : débit d'eau à l'entrée de la colonne de lavage.

L_2 : débit d'eau à l'entrée de la colonne de lavage.

L_3 : débit d'eau à la sortie de la colonne de lavage.

M_{AS} : débit d'air sec [Kg air sec/h].

$C_{p_{air}}$: capacité calorifique de l'air.

$C_{p_{vap}}$: capacité calorifique de la vapeur d'eau.

$C_{p_{liq}}$: capacité calorifique de l'eau.

LV_{T0} : chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau.

ρ : masse volumique [Kg/m³]

Ψ : humidité absolue [%]

Ψ''_{a1} : humidité saturante à l'entrée de la colonne de lavage [Kg H₂O/Kg air sec].

Ψ''_{a2} : humidité saturante à la sortie de la colonne de lavage [Kg H₂O/Kg air sec].

Ψ''_{NO} : humidité absolue d'azote à l'entrée de la colonne de refroidissement [kg H₂O /Kg d'air sec].

Ψ''_{N1} : humidité absolue d'azote à la sortie de la colonne de refroidissement [kg H₂O /Kg d'air sec].

L_e : débit d'eau à 70°C à l'entrée de l'aéro-réfrigérant

L_s : débit d'eau à 80°C à la sortie de l'aéro-réfrigérant.

M_{AH} : débit d'air sec [kg air sec/h]

Ψ_{Air0}''' : humidité saturante à l'entrée de l'aéro-réfrigérant [kg H₂O/kg air sec].

Ψ_{Air}'' : humidité saturante à la sortie de l'aéro-réfrigérant [kg H₂O/kg air sec].

H_e : enthalpie de l'eau à 70°C à l'entrée de l'aéro-réfrigérant [kJ/kg H₂O].

H_s : enthalpie de l'eau à 25°C à la sortie de l'aéro-réfrigérant [kJ/kg H₂O].

$H_{\text{Air}0}$: enthalpie de l'air à 30°C à l'entrée de l'aéro-réfrigérant.

H_{Air} : enthalpie de l'air à 45.6°C à la sortie de l'aéro-réfrigérant.

$C_{p_{\text{air}}}$: capacité calorifique de l'air à la température T_{Air}

$C_{p_{\text{vap}}}$: capacité calorifique de vapeur d'eau à la température T_{Air}

$C_{p_{\text{liq}}}$: capacité calorifique de l'eau à la température T_e

$L_{v T_0}$: chaleur latente de condensation de vapeur d'eau à T_0

T_e : Température d'entrée du l'air chaud.

T_s : Température de sortie du fluide chaud

t_1 : Température d'entrée du l'eau froid.

k_x : coefficient global d'échange de chaleur à partir des caractéristique du fluide chaud (nature et résistance d'encrassement)

Liste des tableaux

| Tableau | Titre de tableau | page |
|----------------------|--|-------------|
| Tableau I.1 | capacité de production de la COX | 16 |
| Tableau I-2 | Points d'ébullition des gaz de l'air | 19 |
| Tableau I.3 | Risques liés à l'utilisation des gaz de l'air | 24625 |
| Tableau II.1 | Sélectivité des adsorbants | 36 |
| Tableau III.1 | Températures de l'interface et débits de refroidissement obtenus | 59 |
| Tableau III.2 | récapitulatif des principaux résultats du calcul des débits de refroidissement | 65 |

Liste des figures

| Figures | Titre de figure | page |
|---------------------|---|------|
| Figure I.1 | Composition de l'air | 18 |
| Figure I.2 | Stockage et le transport au central à oxygène | 24 |
| Figure II.1 | Schéma du processus de Linde pour fractionnement de l'air | 26 |
| Figure II.2 | Turbocompresseur de la centrale à oxygène | 27 |
| Figure II.3 | Colonnes de lavage et de refroidissement de la centrale à oxygène. | 28 |
| Figure II.4 | Schéma des tamis moléculaires de la centrale à oxygène | 29 |
| Figure II.5 | Schéma des échangeurs de chaleur réversibles de la centrale à oxygène | 30 |
| Figure II.6 | Double colonne de rectification | 31 |
| Figure II.7 | Emplacement de la colonne au sein de production | 32 |
| Figure II.8 | Simple colonne | 38 |
| Figure II.9 | Schéma de la double colonne de distillation | 40 |
| Figure II.10 | Tamis moléculaire | 44 |
| Figure III.1 | schéma du principe de lavage de l'air | 47 |
| Figure III.2 | Schéma de la colonne de refroidissement de l'eau par l'azote impure | 47 |
| Figure III.3 | Schéma de la colonne de lavage de l'air. | 49 |
| Figure III.4 | schéma du partage de la colonne de lavage. | 50 |
| Figure III.5 | Schéma de la partie supérieure I de la colonne de lavage | 51 |
| Figure III.6 | Schéma de la partie inférieure II de la colonne de lavage. | 52 |
| Figure III.7 | Schéma de l'Aéro-réfrigérant à contact direct | 60 |
| Figure III.8 | Schéma simple d'Aéro-réfrigérant à contact direct | 60 |

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'unité centrale à oxygène (COX) est au cœur du complexe d'El Hadjar , à proximité des hauts fourneaux et des unités utilisant les gaz d'acétylène pour la soudure ainsi qu'au voisinage des aciéries où se réalisent des réactions d'oxydation de l'acier. Elle comporte deux unités COX3 pour produire l'argon liquide, l'oxygène liquide et gaz, l'azote gaz et liquide, et l'azote impur.

Les systèmes de refroidissement sont fondés sur les principes de la thermodynamique. Ils facilitent les échanges de chaleur entre le fluide de procédé et le réfrigérant ainsi que le rejet de la chaleur non récupérable dans l'environnement. Les systèmes de refroidissement industriel peuvent être classés selon leur conception et le type de réfrigérant utilisé: eau ou air ou une combinaison des deux.

refroidissement par air sec et refroidissement humides par évaporation : en fonction du principe thermodynamique dominant – respectivement le transfert de chaleur sensible et une combinaison de transfert de chaleur latente et sensible. Dans le refroidissement par évaporation, les deux principes sont combinés, mais l'essentiel de la chaleur est transféré sous forme latente. En cas de refroidissement par voie sèche, seul le transfert de chaleur sensible se produit

Les échangeurs de chaleur améliorent l'échange de chaleur entre le fluide de procédé et le réfrigérant. Le réfrigérant transporte la chaleur dans le milieu ambiant. Dans les systèmes en circuit ouvert, le réfrigérant est en contact avec le milieu ambiant. Dans les systèmes en circuit fermé, le réfrigérant ou le fluide de procédé circule dans des tubes ou des serpentins et il n'est pas en contact direct avec l'environnement.

La température du procédé et la capacité de refroidissement nécessaire doivent être garanties à tout moment pour améliorer l'efficacité du procédé industriel ou de fabrication

Plus les procédés sont sensibles à la température, plus le rôle de ce paramètre est important. L'objectif de notre étude et consiste à la vérification des différents paramètres physique de l'installation de refroidissement de l'air en amont de l'adsorbeur au niveau de la centrale à oxygène

L'installation est très sensible à la présence d'impuretés telles que l'humidité, le gaz carbonique et les gaz combustibles. A titre d'exemple, la présence de très faibles concentrations d'acétylène environ 5 ppm dans l'oxygène liquide, provoquera instantanément une explosion. L'ancien système d'épuration de l'air consistait à éliminer l'humidité et le gaz carbonique en tête de l'installation, alors impuretés telles que les gaz combustibles sont éliminés en phase liquide dans des adsorbeurs

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Une introduction générale.
- Un premier chapitre, consacré à des généralités relatives à la présentation de l'unité de production des gaz, ainsi que des notions fondamentales sur l'air atmosphérique.

- Un deuxième chapitre comprenant la description détaillée de l'installation, avec tous équipements qui y sont incorporés.
- Un troisième chapitre consacré au calcul des différents débits des fluides (air, azote et eau) et température de fonctionnement de l'installation avec une partie programmation.
- On termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités

I.1 Historique

I.1.1 Présentation d'EL HADJAR [2.3]

L'entreprise nationale de sidérurgie a été créée par la société bônoise de sidérurgie (SBS) en 1959 suite à la mise en application du plan de Constantine après l'indépendance celle-ci devient (SNS) et ceci dans le cadre de la récupération des richesses du pays, elle est créée en 03-09-1964 située à environ 15 kilomètres de la ville de Annaba et s'étendant sur plus de 800 hectares, en tant que moyen pour assurer le développement du pays et d'amélioration des conditions de la vie du peuple, c'est-à-dire répondre aux impératifs économiques et sociaux du développement du pays.

La (SNS) a bénéficié de différents plans de développement pour s'étendre au fil des nécessités et devenir en fin entreprise nationale de sidérurgie (ENS).

Suite à la restructuration des sociétés nationales, l'ENS est devenue en 1969 une entreprise sidérurgique EL- HADJAR ceci doit répondre à deux sources majeures liées étroitement à la politique économique du pays, à savoir :

- La transformation de nos ressources naturelles (minerais).
- La subvention du pays en matière de produits sidérurgiques et aussi développer une industrie de transformation à travers tout le territoire national.

Le complexe reçoit la matière des mines de L'OUENZA et BOUKHADRA par chemin de fer et le charbon des pays européens et asiatique, le minerai arrive à EL HADJAR est déchargé, stocké et ensuite traité pour devenir une pâte que nous appelons agglomère, directement acheminé vers les hauts fourneaux pour fusion et donc nous obtenons une fonte liquide que doit être par la suite transformée par les différents ateliers du complexe.

Arcelor Mittal est une société fille de SIDER du holding indien MITTAL.

En effet le 18 /10/2001 SIDER a signé un protocole d'accord avec LNM HOLDING lui cédant les actifs de dix de ses filiales à savoir :ALFASIDE ,AMN ,CORPOSID ,ALMAIN ,GESSIT ,CRYOSID ,FERSID ,COMERSID ,ALFATUBE ET IMPORT pour la création de la SPA ISPAT ANNABA pour devenir en 2005 MITTAL STEEL ANNABA après une intégration dans le holding LNM et changement de raison commerciale.

Dans le cadre politique d'indépendance économique, la République algérienne a essayé de réanimer le complexe en 2015 sous le titre de SYDER.

I.1.2 PRESENTATION DE L'UNITE [3]

La centrale à oxygène est une installation vitale pour le complexe sidérurgique, son dysfonctionnement se répercute directement sur le marché des principales installations particulièrement les aciéries à oxygène. Elle produit l'oxygène, l'azote et l'argon, dont l'objectif est la satisfaction en qualité et en quantités des besoins des différents ateliers du groupe SIDER, et du marché national dans ce domaine. Elle dispose de quatre unités de production indépendantes et dont les capacités figurent dans le tableau ci-après :

Tableau I.1 capacité de production de la COX

| produit | unité | Capacité théorique | | Capacité réelle | | Production réelle annuelle*10 ⁶ | |
|---------|-------|--------------------|---------|--------------------|---------|--|---------|
| | | gaz | Liquide | gaz | liquide | Gaz | liquide |
| | | Nm ³ /h | L/h | Nm ³ /h | L/h | Nm ³ /ans | L/ans |
| Oxygène | COX1 | 2930 | 293 | - | - | - | - |
| | COX2 | 4500 | 356 | - | - | - | - |
| | COX3 | 14500 | 1000 | 12000 | 350 | 105 | 3 |
| | COX4 | 14500 | 1000 | - | - | - | - |
| Azote | COX1 | 700 | 356 | - | - | - | - |
| | COX2 | 1500 | 500 | - | - | - | - |
| | COX3 | 8000 | 500 | 8000 | 350 | 70 | 3 |
| | COX4 | 5000 | - | - | - | - | - |
| argon | COX3 | - | 250 | - | 200 | - | 1.75 |

Les deux unités (COX 1,2) sont à l'arrêt et la quatrième en préparation de démarrage
Le tableau 1, montre que l'unité COX 3 est la seule capable de produire de l'argon cette unité est mise en service en juillet 1980 par la société SAT-LINDE avec une production horaire :

- 14500 Nm³/h Oxygène à une pureté de 99,7%.
- 8000 Nm³/h Azote à une pureté de 99,9%.
- 250 Nm³/h argon à une pureté de 99,999%.

Elle est composé de :

- 01 turbo compresseur de 91000 Nm³/h.
- 02 tamis moléculaire.
- 02 tours de refroidissement.
- 04 pompes à eau.
- 02 blocs d'échangeurs thermiques.
- Des colonnes de rectification d'air.
- 02 adsorbants.
- 02 turbines.
- 02 pompes à oxygène liquide.
- Purificateur d'argon.
- Une colonne de mixture d'argon.
- Compresseur d'argon brut.
- Groupe frigorifique.
- Colonne de rectification d'argon brut.

I.2 Les Marchés des produits

I.2.1 Utilisations interne

Le principal client en produit gazeux est ALFASID dont les besoins sont destinés essentiellement aux aciéries (ACO1, ACO2, ACE), les autres filiales utilisent généralement l'oxygène pour l'oxycoupage (exemple FERSID). L'azote est utilisé pour le barbotage dans les aciéries, la galvanisation, l'instrumentation et l'interagie.

A terme l'azote sera remplacé par de l'argon pour le barbotage au niveau des aciéries.

- Les ateliers consommateurs d'oxygène (GAZ) sont : ALFASID, FERSID, COPROSID, ALFATUB, ALFATUS
- Les ateliers consommateurs d'azote (GAZ) sont :
Le LAMINOIR AFROID, LES HAUTS FOURNEAUX, LES RESEAUX INERTAGE...
- Les ateliers consommateur d'argon liquide sont : ALFASID.

I.2.2 Ventes externe

L'entreprise Nationale des gaz Industriels (ENGI) dans un premier temps reste le client incontournable des produits liquides.

Le marché des produits gazeux reste conditionné par la disponibilité de l'emballage et des moyens de transport qui doivent être acquis ultérieurement.

I.3 Généralités sur l'air

I.3.1 Composition de l'air [5,7]

L'air est un mélange des gaz, constituants principalement en 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 CO₂ et d'autres gaz inertes néon, hélium, krypton et xénon. L'air peut être séparé dans ses composants par la distillation dans les unités spéciales. L'air est habituellement considéré comme uniforme gaz (aucune variation ou fluctuation) avec des propriétés ramenées à une moyenne des propriétés des ses différents composants.

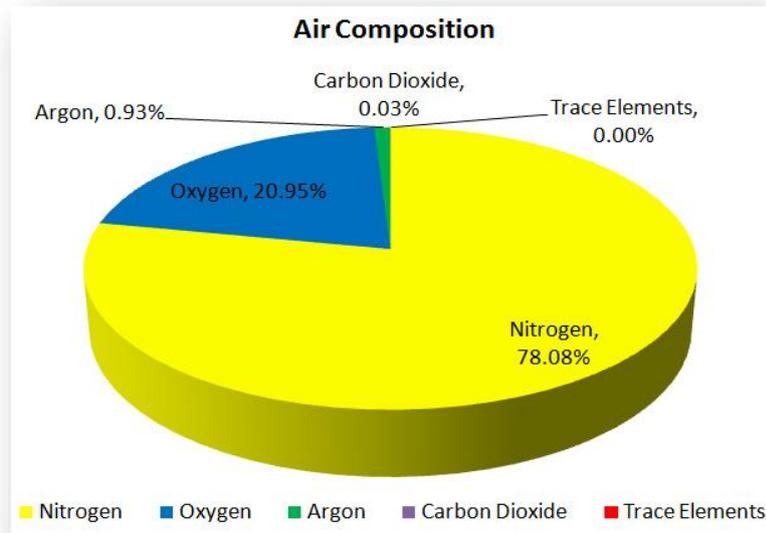


Figure I.1 : Composition de l'air [7].

L'air sec est relativement uniforme en composition, avec les constituants primaires comme il est montré ci-dessous. L'air ambiant, peut avoir jusqu'à la teneur en eau environ de 5% (par le volume) et peut contenir un certain nombre d'autres gaz (habituellement des traces) qui sont enlevés à un ou plusieurs points dans la séparation d'air et le système de purification de produit.

- En plus des constituants déjà cités, l'air se compose de différents impuretés et contaminants :
- **La vapeur d'eau:** qui se trouve à une teneur variable, suivant les conditions météorologiques, et sous plusieurs formes : vapeur, gouttelettes en suspension, particules de glace.
- **Des polluants** : tels que les hydrocarbures (méthane, éthane, éthylène, propane.....)
- **Des gaz acides** : tel que H_2 , S_2 , SO_2 , HCl , SO_3 , CO_2 qui sont des agents corrosifs.
- **Bactéries et poussières** :
La plupart de ces composants ont un effet inquiétant sur le processus et doivent être enlevées par des méthodes comme filtration et épuration par adsorption ou absorption.

I.3.2 Points d'ébullition des composants de l'air [5,1]

Sont données dans la **figure I-2**, ces points d'ébullition sont mesurés à la pression atmosphérique.

Tableau I-2 : Points d'ébullition des gaz de l'air [6]

| GAZ | Vol % | T _{eb} [°C] |
|-----------|----------|----------------------|
| Nitrogène | 78.08 | -195.8 |
| Oxygène | 20.95 | -183.0 |
| Argon | 0.93 | -185.9 |
| Hélium | 0.005 | -268.9 |
| Néon | 0.0018 | -246.1 |
| Krypton | 0.00011 | -153.2 |
| Xénon | 0.000009 | -108.0 |

I.4 Généralités sur les composants de l'air (l'oxygène et azote)

Comme nous avons vu, les deux composants les plus dominants sont l'Oxygène et l'Azote, nous allons détailler ci-après leurs propriétés ainsi que leurs applications.

I.4.1 Propriétés et utilisations de L'oxygène

L'oxygène est un gaz dans les conditions ordinaires (15°C et 1 bar), est un gaz indispensable à la vie. Il est incolore, sans odeur, et sans saveur. A la pression atmosphérique pour des températures inférieures à (- 183°C), c'est un liquide bleu pâle. C'est un gaz très réactif et corrosif qui se combine directement à la plupart des éléments pour former des oxydes. L'oxygène tient son nom d'une erreur de la science naturelle ancienne. Au 18ème siècle, les pionniers de la chimie pensaient que ce gaz incolore et inodore était responsable de la formation des acides. C'est pourquoi, ils l'ont appelé Oxygenium (formateur d'acide), dérivé du mot grec oxys qui veut dire acide.

a) Propriétés physiques & chimiques

Formule chimique O₂, Numéro atomique Z = 8 et sa Masse molaire est 31.9987 g/ mole. Point d'ébullition : (- 183 °C), Point de congélation : (- 219 °C).

L'oxygène liquide sous pression atmosphérique n'occupe que 1/854ème de son volume gazeux. L'oxygène est très réactif, il se lie avec presque tous les autres éléments. Il intervient dans la plupart des procédés de combustion et de corrosion.

Extraction : Séparation d'air.

Ressources : 20,9 % dans l'air ; 50,5 % dans l'ensemble de l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère Plus de la moitié, à savoir précisément 50,5 % des parties de notre planète accessibles à l'homme, sont composés d'oxygène. C'est le pourcentage de cet élément dans l'atmosphère, l'hydrosphère (les eaux) et la lithosphère jusqu'à une profondeur de 16 kilomètres.

Rien que par sa masse, l'oxygène est ainsi l'élément de base le plus important de notre monde D'ailleurs, dans l'espace, l'oxygène est le troisième élément après l'hydrogène et l'hélium, mais avec une fraction massique beaucoup moins importante que sur terre. Dans le système solaire, il représente environ 0,8 %. Le caractère réactif de l'oxygène est exploité par des entreprises industrielles qui cherchent à rendre leurs productions plus efficaces à moindres coûts : l'oxygène intervient dans la plupart des procédés industriels dans lesquels des combustions ou réactions chimiques jouent un rôle, depuis le recuit d'acier jusqu'au traitement d'eau.

b) Principales applications de l'Oxygène

La circulation sanguine, dans notre corps, absorbe l'oxygène de l'air dans nos poumons pour alimenter les cellules. Les fournisseurs de soins de santé emploient l'oxygène médical pour des patients dans la chirurgie et pour ceux qui ont des difficultés respiratoires. L'oxygène médical joue un rôle important en tant que gaz respirable. L'oxygène favorise la combustion, ainsi il aide les fabricants d'économiser l'énergie de montagne et réduisent l'émission des gaz tels que l'anhydride carbonique, l'oxyde d'azote ou l'oxyde de soufre.

En utilisant l'oxygène enrichi, l'air augmente l'efficacité de production dans les applications de traitement d'acier, d'ergol combustible, le verre, l'industrie chimique et métallurgique. Les fabricants de l'aluminium, du cuivre et de l'or emploient l'oxygène pour enlever des métaux de manière plus efficace.

Les industries chimiques et pétrolières combinent l'oxygène avec les hydrocarbures pour produire des produits tels que l'antigel, le plastique, les polymères, et le nylon.

L'oxygène permet par exemple de faciliter le thermoformage et le raffinage du verre. L'industrie du papier utilise l'oxygène pour augmenter la blancheur de papier tout en réduisant le besoin d'autres produits chimiques de blanchiment.

Les usines de traitement des eaux usées emploient l'oxygène pour donner aux procès de traitement plus d'efficace et aussi d'augmenter la capacité des bassins pendant les expansions ou les renversements d'usine.

Accélération des réactions d'oxydation dans différents secteurs et procédés ; augmentation des températures de procès dans la métallurgie, l'industrie des céramiques et du verre ; accélération de procédés biologiques et biochimiques, par exemple dans le cadre du traitement d'eau usées (stations d'épuration biologique) ; ainsi que beaucoup d'autres applications encore.

I.4.2 Propriétés et utilisations de L'Azote

L'azote est un gaz dans les conditions ordinaires 15 °C et 1bar, est un gaz incolore, sans odeur et sans saveur.

C'est le composant principal de l'air (78.08 % en volume) à la pression atmosphérique, pour des températures à (- 196°C); c'est un liquide incolore, un peu plus léger que l'eau.

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

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

Son nom allemand (Stickstoff = matière étouffante) vient du fait qu'il est capable d'étouffer aussi bien des flammes que tout être vivant. Le nom scientifique Nitrogenium est dérivé du mot grec « nitros » qui veut dire nitrate de potassium, molécule à partir de laquelle l'azote était extrait avant l'invention de la séparation d'air.

a) Propriétés physiques & chimiques

Formule chimique N₂, Numéro atomique Z= 7, Masse molaire 28.0134 g/mole

Point d'ébullition : (-196 °C), Point de congélation : (- 210 °C).

En condensant, l'azote moléculaire neutre à l'odeur et au goût devient un liquide incolore. Il est extrêmement peu réactif, ne se dissout pratiquement pas dans l'eau et il est ininflammable.

Ressource: Présent à environ 78 % en volume, l'azote est le composant le plus important de l'air, sa fraction massique par rapport à la lithosphère est de 0,03 %.

99 % de l'azote de la terre se trouvent dans l'air. La plupart des plantes consomment de l'azote à partir de composés présents dans les terres arables. C'est pourquoi, plus de 80 % de la production d'azote mondiale (environ 40 millions tonnes par an) sont utilisés uniquement pour la fabrication d'engrais chimique.

Extraction : Séparation d'air.

b) Principales applications de L'azote

L'azote est un composant essentiel des aminoacides et, en tant que tel, un élément de base de toute forme de vie. Sans cet élément dont le symbole chimique est N, il n'y aurait pas de métabolisme, pas de protéines et pas d'ADN, ni pour les plantes ni pour les animaux ou les hommes. L'azote représente presque 2 kg du poids d'un adulte de 70 kg.

De l'azote pur est entre autres utilisé pour gonfler les pneus des avions de sorte que les roues ne prennent pas feu lors du décollage et de l'atterrissage suite au fort développement de chaleur. L'azote fait aussi fonction de gaz propulseur, un gaz de protection (exemple l'emballage de produits alimentaires).

L'azote liquide est utilisé en cryogénie comme moyen de refroidissement, par exemple pour stocker des produits alimentaires ou pour la surgélation rapide.

D'autres domaines d'application de l'azote liquide sont le refroidissement du béton, la congélation des sols en génie civil ainsi que la cryochirurgie dans le domaine médical.

L'exemple le plus connu pour cette dernière est la « cryoablation » de verrues (brûlure par un froid extrême).

La majorité des industries emploient l'azote liquide et le gaz d'azote et aussi l'azote rend beaucoup de processus industriels plus sûrs et sécurisé pour les ouvriers et les consommateurs.

Les raffineries et les centrales pétrochimiques et les camions-citernes marins emploient l'azote gazeux pour nettoyer des vapeurs et des gaz de l'équipement qu'elles utilisent.

Plusieurs industries emploient également l'azote gazeux « pour couvrir, » ou pour maintenir une atmosphère protectrice inerte au-dessus des produits chimiques dans le procès et le stockage des équipements.

Les ateliers de construction mécanique emploient l'azote liquide au lieu des fluides de découpage dans des opérations d'usinage, qui élimine le besoin de produits à base de d'huile. Les fabricants emploient l'azote liquide pour refroidir les matériaux mous ou sensibles à la chaleur ainsi ils peuvent les rectifier.

Ils emploient le moulage cryogénique pour produire, des épices, des plastiques et des colorants.

Les recycleurs emploient l'azote liquide pour refroidir des polymères comprenant le plastique et le caoutchouc ainsi ils peuvent les rectifier et récupérer les matières premières principales employées pour fabriquer de nouveaux produits.

Par exemple, ils emploient l'azote pour transformer les chutes de pneus en caoutchouc en produits utilisables, comme voies courantes synthétiques, au lieu de jeter le caoutchouc dans l'environnement.

Plusieurs nourritures que nous mangeons sont congelées dans des congélateurs refroidit par l'azote. Puisque l'azote est si froid, il améliore souvent la qualité des produits d'aliments surgelés.

L'azote liquide remplace les réfrigérants traditionnels, tels que les fluoro-carbones et l'ammoniaque, qui peuvent causer des soucis environnementaux ou de santé. Lors de son utilisateur dans certain installation de fabrication.

Après que l'azote refroidi la nourriture, va sans risque de nouveau dans l'air.

I.5 Utilisation industrielle, Stockage et transport [6]

L'oxygène généralement se trouve soit comme gaz à haute pression soit comme un liquide froid. Souvent le stockage des grandes quantités de l'oxygène se fait en forme liquide, parce qu'il occupe beaucoup moins d'espace, et selon la quantité le moyen de stockage à utiliser sont les cylindres ou des tubes à haute pression.

Le stockage et la manipulation des cylindres de gaz comprimé sont régis par les normes industrielles.

Les ouvriers devraient utiliser les gants vigoureux, les lunettes de sécurité avec les boucliers latéraux pour protéger les yeux et le visage, et les chaussures de sûreté gants isolés thermiques, une longue chemise gainée et pantalon sans manchettes, en manipulant des cylindres de gaz comprimé.

En raison de sa basse température, l'oxygène liquide ne devrait pas contacter la peau, sinon peut causer des brûlures de troisièmes degrés.

Les zones de travail Confinées doivent être examinées pour des niveaux de l'oxygène avant l'entrée.

Si le niveau de l'oxygène est plus bas que 19.5 %, personnel y compris des sauveteurs, doivent ne pas entrer dans le secteur sans équipement de respiration spécial qui fournit une indépendante source d'air de respiration propre.

Le stockage de l'oxygène liquide dans trois différents types de récipients, les Vases Dewar, les cylindres de liquide cryogénique et les réservoirs de liquide cryogénique.

Pour répondre aux besoins en petites quantités, les gaz sont stockés dans des bouteilles sous pression.

Lorsque le besoin de gaz industriels est en grandes quantités, sur le site d'utilisation vont être installés des réservoirs fixes permettant de stocker des gaz sous forme liquide. Les gaz liquéfiés sont transportés depuis les sites de production jusqu'à chez les consommateurs dans des camions citernes, dans des bouteilles sous pression.

Les grands sites industriels tels que les aciéries ou les industries chimiques, ont des besoins en oxygène et l'azote si importants qu'une unité de séparation d'air est parfois exploitée à demeure sur leurs sites.

Plusieurs grandes entreprises peuvent être aussi alimentées en gaz industriels par des réseaux de pipelines, notamment dans des zones industrielles

Plus un utilisateur a des besoins en gaz industriels élevés, plus il se doit d'être proche du lieu de production des gaz qu'il utilise. En règle générale, les gaz sont produits là où se trouvent les besoins, à savoir à proximité des zones industrielles importantes.



Figure I.2 : Stockage et le transport au central à oxygène

I.6 Risque liés à la production des gaz de la COX [4]

Le tableau suivant montre les différents risques qui accompagnant la production des gaz.

Tableau I.3. Risques liés à l'utilisation des gaz de l'air.

| GAZ | Dangers | Précaution de manipulation | Action en cas d'accident |
|--|---|--|---|
| Oxygène (O₂) GOX | Combustion -à partir de 25c° d'O ₂ dans l'air, la combustion est accélérée -à partir de 30%, la combustion est rapide -Des 50% il y a risque d'explosion, combustion instantanée. Respiration-Nausées, crampes, malaises lors de l'inspiration de mixture contenant plus de 75% d'oxygène. | -Faire une prévention des fuites. -Analyser l'air ambiant : DANGER>24% O₂ Eviter de travailler en atmosphère suroxygénée. -Etablir des procédures, des permis de travail, des permis de feu. -Entraîner le personnel. -Utiliser des vêtements propres, pas de graisse, ni d'huile, de l'outillage<<oxygène service>> Douches de rinçage installées et disponibles. | -Donner l'alerte Se protéger, ne pas devenir la deuxième victime. -doucher en cas de feu est meilleur façon d'éteindre le feu. Donner les premiers secours : Evacuer la victime de l'aire de danger. Doucher et rincer les parties brûlées pendant plus de 15 min -Ne jamais déshabiller une victime. Appeler les services médicaux. |
| | | -Eviter les fuites. -Analyse de l'atmosphère : DANGER<18% O₂ | -Donner l'alerte -Déplacer la victime de l'air dangereuse (sauveteur équipé d'un |

| | | | |
|--|-----------------------------------|---|---|
| <p>Azote (N₂) GAN</p> | <p>Respiration : Asphyxie</p> | <p>-quitter les lieux -Procédures, permit de travail -Entrainement. -Equipement de réanimation disponible. Equipement autonome de respiration disponible</p> | <p>équipement autonome de respiration). -Donner les soins de réanimation. Appeler l'assistance médicale.</p> |
| <p>Argon (Ar) GAr</p> | <p>Respiration : Asphyxie</p> | <p>-Eviter les fuites. Analyser l'atmosphère : DANGER<18 O₂ Quitter les lieux -procédures, permit de travail -Entrainement. Equipement de réanimation disponible. Equipements autonome de respiration disponible</p> | <p>-Donner l'alerte -Déplacer la victime de l'aire dangereuse (sauveteur équipé d'un équipement autonome de respiration). Donner les soins de réanimation. Appeler l'assistance médicale.</p> |

CHAPITRE II

Description du processus de production des gaz de l'air

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la description détaillée du processus de production des gaz de l'air au niveau de la centrale à oxygène située au niveau du complexe sidérurgique d'EL-Hadjar.

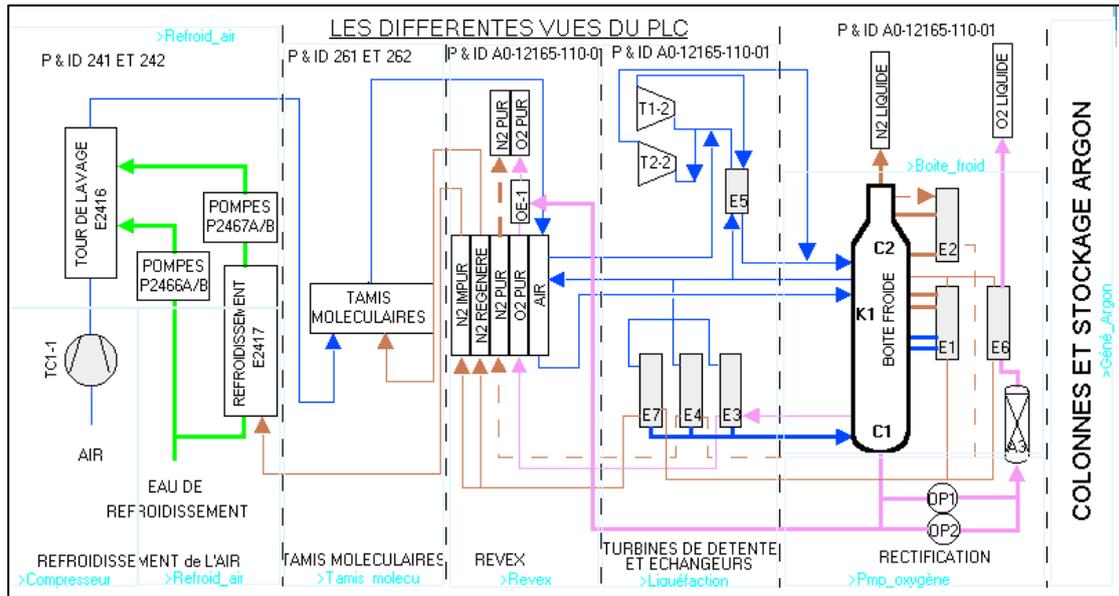


Figure II.1. Schéma du processus de Linde pour fractionnement de l'air.

II.2 Séparation de l'air [8, 9,10]

Le procédé du fractionnement de l'air comporte les opérations suivantes :

- Aspiration
- Filtration
- Compression
- Lavage et refroidissement
- Epuration
- Refroidissement
- Liquéfaction
- Distillation

II.2.1 Procédé de la séparation de l'air (Linde)

L'installation de fractionnement d'air fonctionne suivant le principe du procédé LINDE, qui consiste à fractionner l'air liquéfié en ses différents composants, basé sur les différents points d'ébullition. Par conséquent l'installation de fractionnement d'air doit être en mesure d'exécuter les opérations suivantes :

II.2.2 Aspiration et filtration

L'air est aspiré dans les conditions normales et de température ambiante à l'aide d'une cheminée mise en contact de l'atmosphère. Il passe à l'unité de filtrage qui contient deux filtres (à rouleaux et a sacs) à un taux de filtrage différent pour assurer le filtrage d'un débit d'air de 100.000 Nm³/h

- 1-Le premier retient toutes les particules solides d'une dimension supérieure à 0,005mm Contenant dans l'air.
- 2-Le second filtrage son rôle est l'épuration secondaire de d'air des fines particules solides.

II.2.3 Compression de l'air

Après avoir été filtré, l'air entre dans le turbo compresseur qui est une machine centrifuge, le rôle de celle-ci est d'aspiré et comprimer l'air de façon polytropique et refouler.

Ces opérations auront lieu au niveau de cinq étages ; entre ces derniers il y'a quatre réfrigérants intermédiaires pour :

- a- Le refroidissement par contact indirect de l'air refoulé de chaque étage.
- b- La diminution de la quantité d'eau présente dans l'air.

Le refoulement de dernier étage se fait à une pression entre 5 et 5,6 bars et une température de 80°C.

L'air sortant de compresseur sera acheminé vers la colonne de lavage.

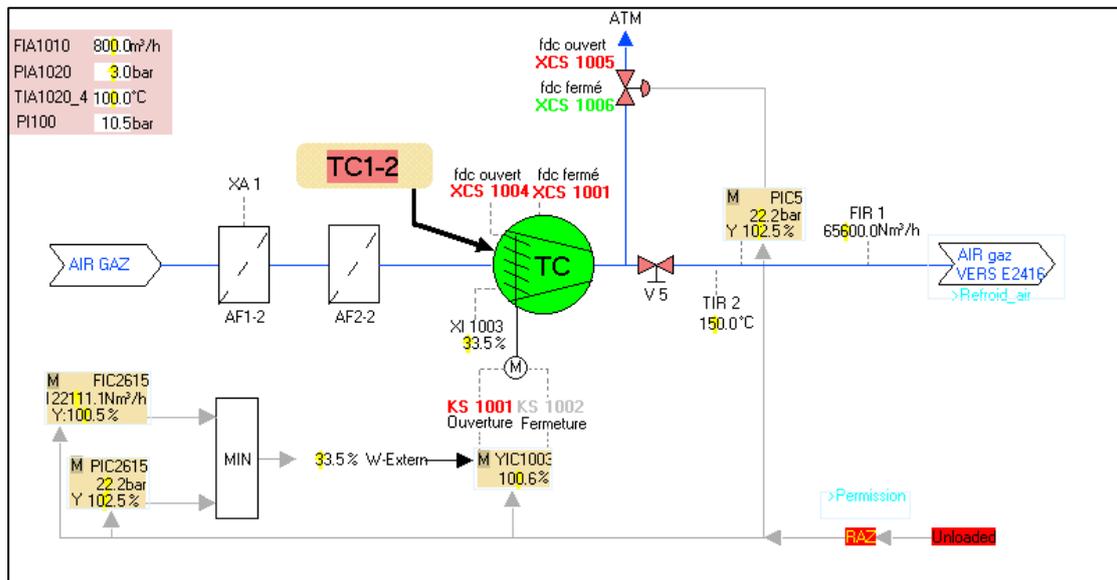


Figure II.2. Turbocompresseur de la centrale à oxygène.

II.2.4 Lavage et refroidissement

Par contact direct avec l'eau, la tour de lavage d'air engendre le refroidissement et l'épuration des poussières restantes dans l'air. L'eau du procédé est refroidie avec l'air ambiant dans l'aéro-réfrigérant et tronçonnée en deux à l'aide de deux pompes, l'une refoulant dans la colonne de lavage directement, et l'autre refoulant dans une colonne de refroidissement avec l'azote impure issue de l'installation.

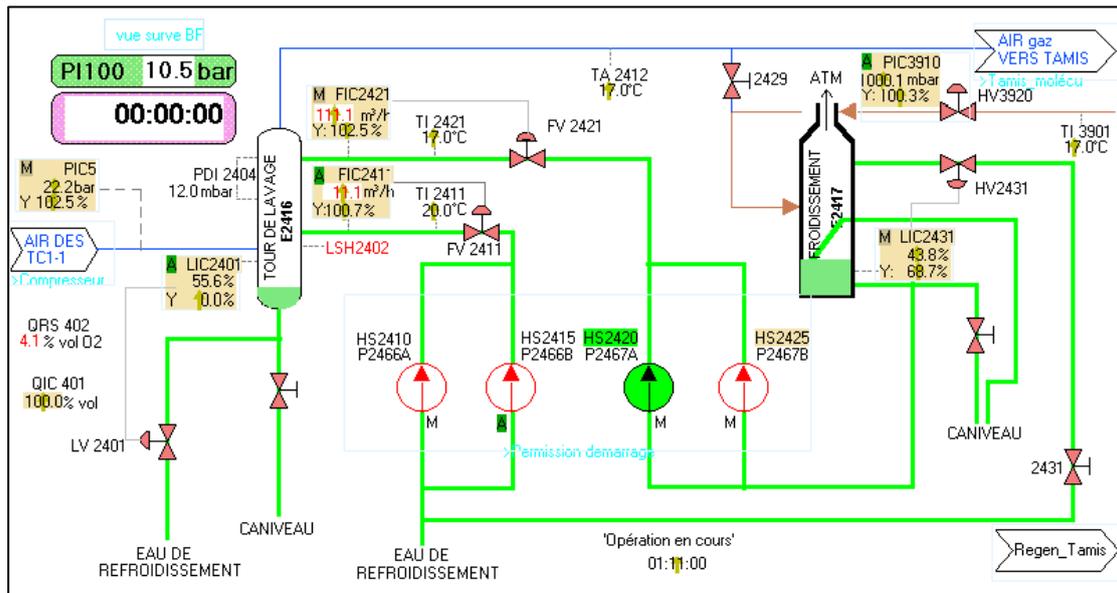


Figure II.3. Colonnes de lavage et de refroidissement de la centrale à oxygène.

II.2.5 Séchage et élimination du gaz carbonique de l'air

L'air sort de la colonne de lavage saturé en eau, il est envoyé vers les adsorbants où il sera purifié en piégeant ses constituants (humidité, dioxyde de carbone, hydrocarbures, particules de poussière) afin d'éviter la formation de bouchons de neige carbonique et de glace lors de refroidissement.

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

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

L'air du procédé saturé en eau, après la tour de lavage, pénètre à présent dans l'un des deux adsorbants à tamis moléculaires, l'humidité et le dioxyde de carbone ainsi que les hydrocarbures sont adsorbés dans les tamis, lesquels sont constitués de deux lits : l'alumine (Al_2O_3) pour retenir les hydrocarbures, et le 13X pour retenir l'humidité.

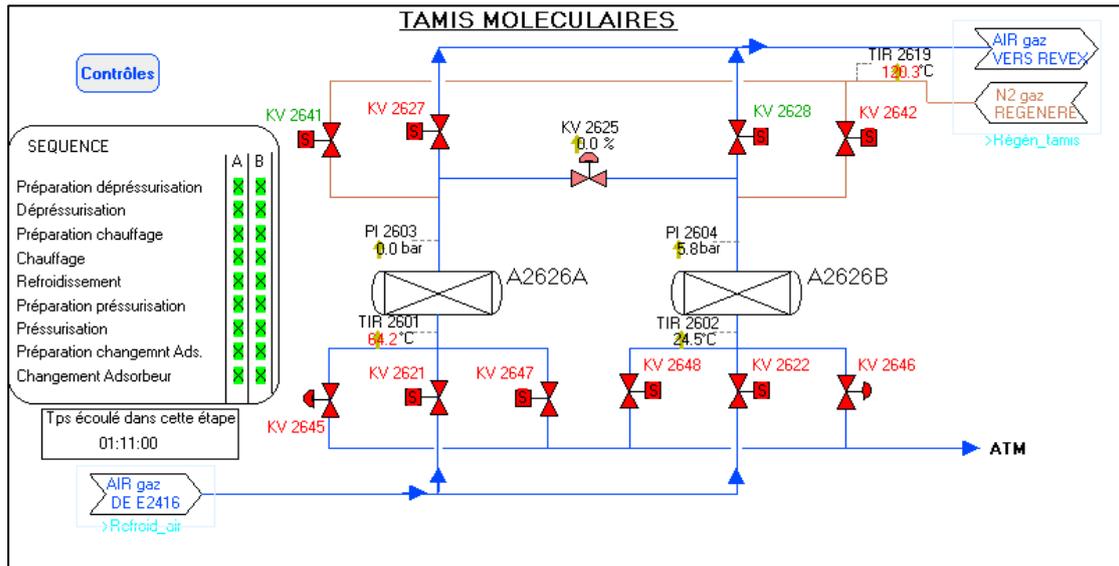


Figure II.4. Schéma des tamis moléculaires de la centrale à oxygène.

II.2.6 Refroidissement de l'air à température de liquéfaction

Pour atteindre les basses températures nécessaires à liquéfaction de l'air, ce dernier traverse un système d'échangeur de chaleur appelée revex, qui se compose d'échangeur (bout chaud) et d'échangeur (bout froid). Le travail se fait à contre-courant avec les fluides produits par la rectification de l'air lui-même et sont donc à de très basses températures.

L'air traverse successivement ces deux blocs en récupérant les frigories et cédant ses calories. Dans le bout chaud il atteint la température de 80°C et sera refroidi à sa température de rosé de (-173°C) dans le bout froid.

L'air sortant de revex acheminé vers la colonne de rectification.

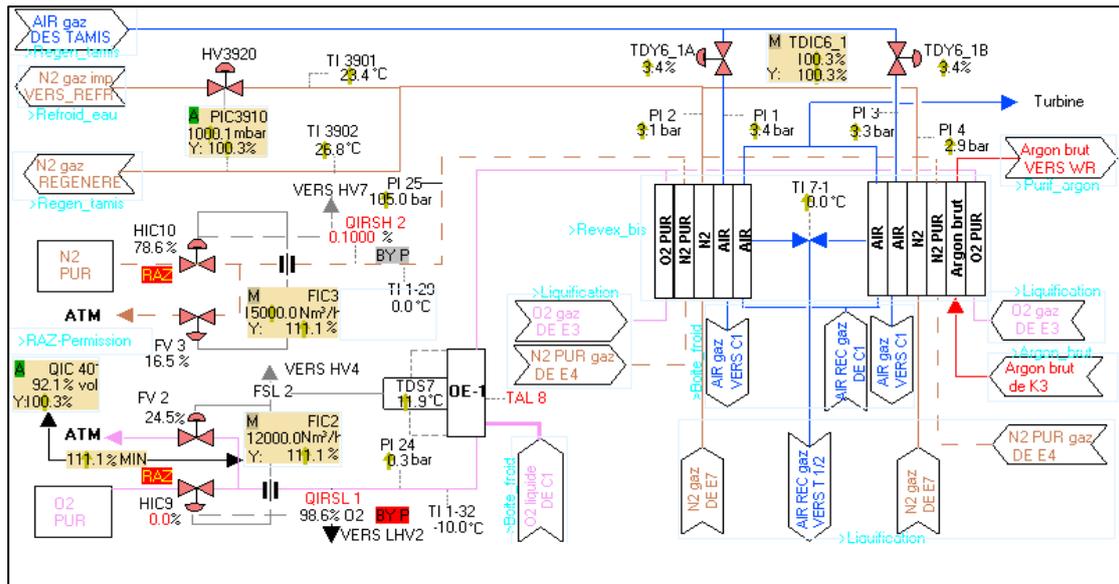


Figure II.5. Schéma des échangeurs de chaleur réversibles de la centrale à oxygène.

II.2.7 Colonne de rectification

Celle-ci se compose de deux colonnes :

- Une colonne inférieure (moyenne pression) fonctionnant à 5,3 bars abs.
- Une colonne supérieure (basse pression) située au-dessus de la colonne inférieure fonctionnant à 1,4 bars abs ; à sa base se trouve un condenseur/évaporateur.

II.2.8 Colonne inférieure (moyenne pression)

Après avoir atteint la température de (-173°C) qui représente sa température de rosée, l'air venant des revex se partage en deux, une petite partie se dirige vers les revex bout froid pour être utilisée comme débit de renvoi, ensuite elle est détendue dans les turbines à 0,4 bars. Lors de cette opération adiabatique la température de l'air diminue et l'énergie ainsi perdue par l'air fait tourner la turbine ; l'autre partie principale pénètre dans la basse colonne, passe à travers des plateaux perforés, en s'enrichissant du corps le plus volatil (azote) au fur et à mesure qu'il monte par différence de pression. Après le dernier plateau l'azote rencontre où il se liquéfie sera soutiré en liquide pauvre supérieur avec une teneur de 0,1% d'oxygène.

La partie restante faisant le chemin opposé de l'autre après avoir traversé quelques plateaux. On soutire un liquide contenant 95% d'azote appelé liquide pauvre inférieur, ce qui reste descend vers le bas de la colonne en s'enrichissant du corps le moins volatil (oxygène). Ce dernier constitue un liquide riche contenant jusqu'à 40% d'oxygène au niveau de la cuve qui sera soutiré, filtré dans des adsorbants contenant du gel de silice ou se déposent les hydrocarbures, en suite passe par des sous-refroidisseurs avant d'être détendu dans une valve d'expansion pour alimenter la haute colonne, ces trois liquides sont récupérés pour servir le reflux à la haute colonne.

II.2.9 Colonne supérieure (basse pression)

L'alimentation de cette colonne se fait en liquide riche, liquide pauvre inférieure et supérieur et en air venant de la turbine.

Comme dans la colonne inférieure la séparation des gaz faite par la différence de pression.

Le soutirage de l'oxygène liquide se fait juste au-dessus du condenseur et on obtient de l'oxygène gaz au-dessus du niveau précédent par l'évaporation de l'oxygène dû à l'échange thermique obtenue par contact indirecte avec le gaz de la basse colonne.

Si le pourcentage de l'oxygène liquide dépasse les 50%, on le stocke, s'il est inférieur à 50% on arrête le stockage, on diminue le débit de soutirage d'oxygène gaz et on fait augmenter les puissances des turbines.

L'extraction de l'azote pur gazeux ainsi que liquide se fait au sommet de la haute colonne (minaret), par contre on soutire l'azote impure de régénération à l'état gazeux en dessous du minaret.

Le soutirage de l'argon se fait au milieu de cette colonne dont le pourcentage d'oxygène est 97% l'argon 3%, l'extraction de l'argon est faite dans une colonne de mixture.

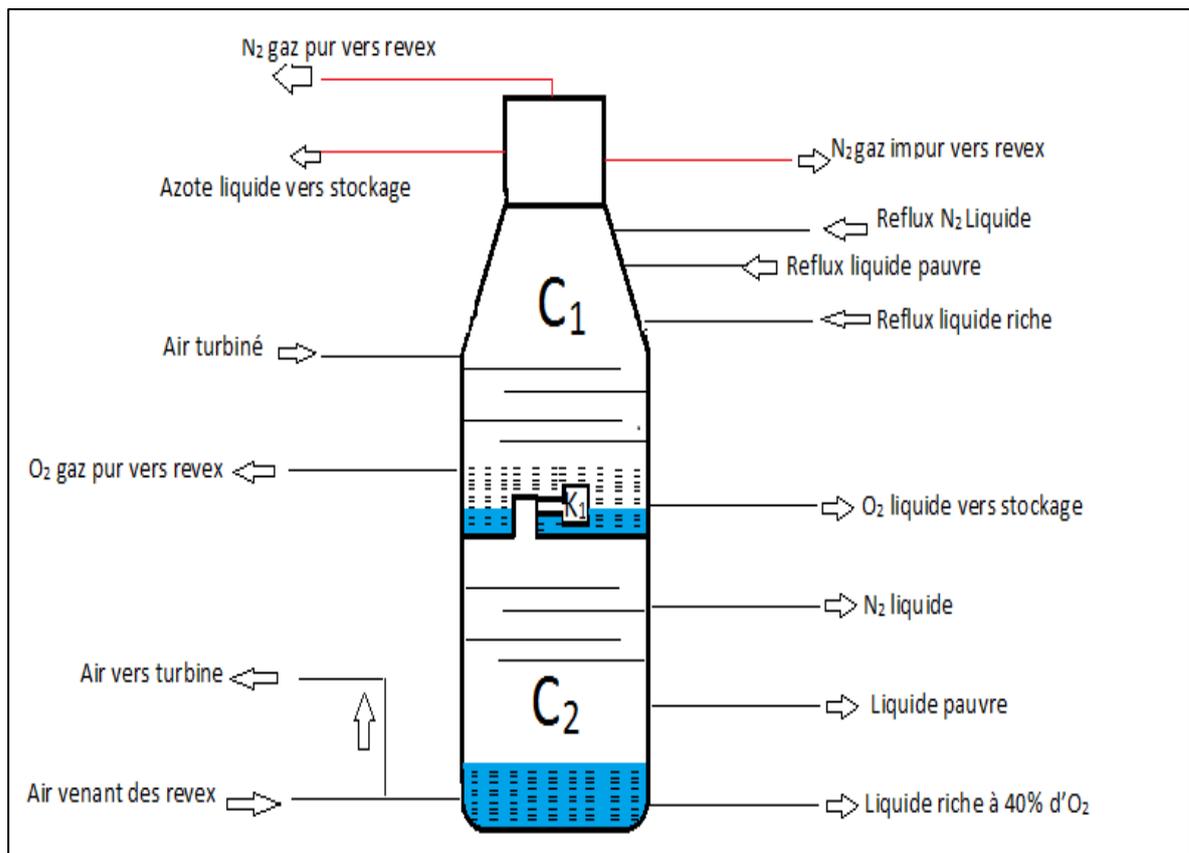


Figure II.6. Double colonne de rectification

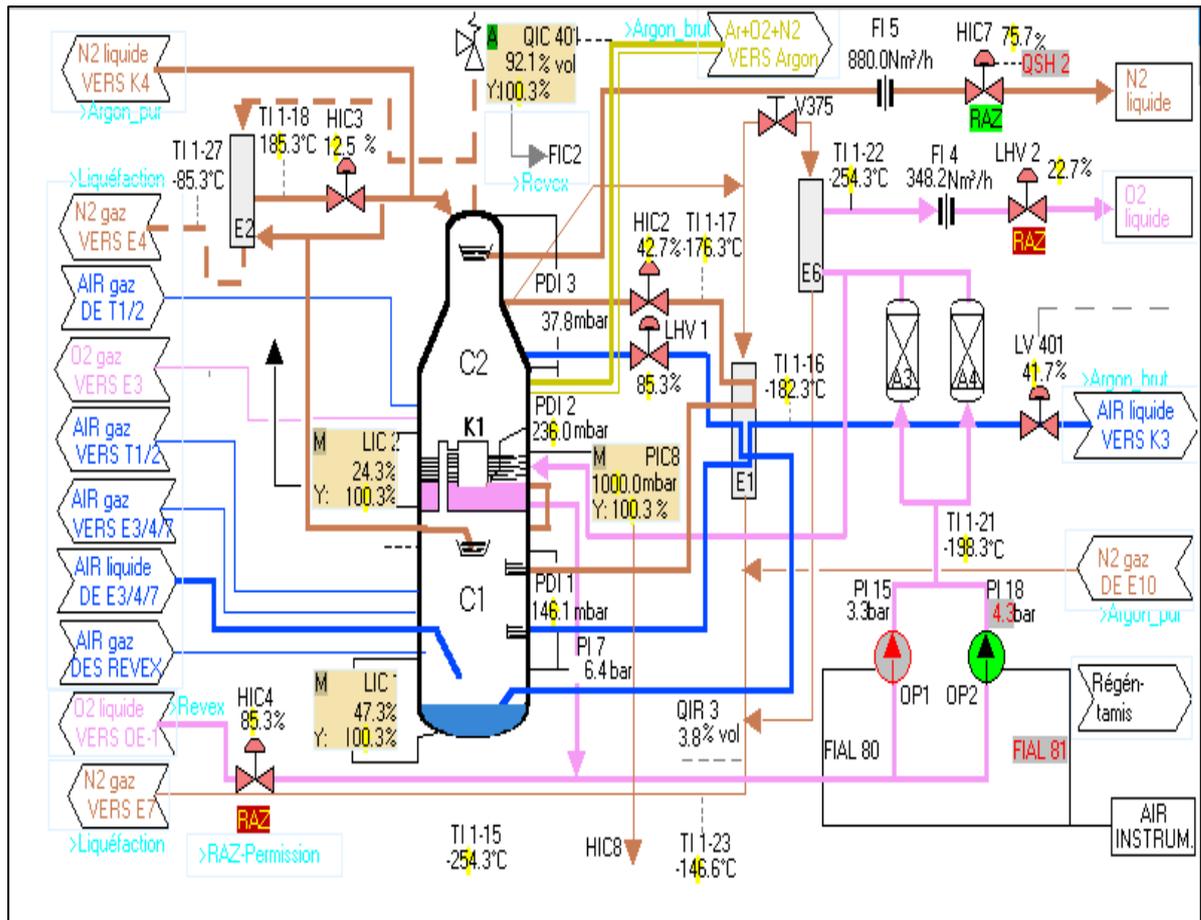


Figure II.7. Emplacement de la colonne au sein de production

II.3 Production d'argon

La production d'argon se fait en trois phases :

- D'abord de l'air brut est produit dans la colonne adéquate raccordée à la colonne basse pression l'argon brut lequel contient encore de l'oxygène et de l'azote; l'argon brut est ensuite réchauffé dans un échangeur et quitte la partie basse température.
- Dans la deuxième phase s'effectue l'extraction de l'oxygène, pour la suite du procédé l'argon brut doit être comprimé, une quantité équivalente d'oxygène à celle d'oxygène sera incorporée avant ou après la compression l'oxygène et l'hydrogène réagissent à l'aide du catalyseur du DEOXO pour produire de l'eau.

L'argon brut atteint alors une haute température et aura refroidi dans plusieurs échangeurs à air à eau et groupe réfrigérant, l'eau produite sera évacuée dans un séparateur d'eau, l'humidité alors restante sera captée dans des déshydratants à gel de silice.

La purification finale a lieu dans la troisième phase, l'argon sera refroidi jusqu'à sa température de liquéfaction et les traces d'azote et d'hydrogène seront extraites dans la colonne de rectification d'argon pur.

L'argon pur est recueilli dans la partie basse de la colonne de rectification d'argon pur. L'argon pur est recueilli dans la partie basse de la colonne d'argon peut être soutiré soit sous forme gazeuse ou liquide.

II.4 Stockage des produits [4]

Les produits liquide de l'installation (oxygène, argon, azote) sont évacués directement dans 03 récipients cylindrique verticaux à la pression atmosphérique.

Par contre les produits gazeux (oxygène, azote) passent par 03 compresseurs à pistons qui permettent de comprimer soit l'oxygène ou l'azote au minimum jusqu'à 33 bars et à température (-10°C+30°C) et ensuite ils sont stockés dans 16 cigares et 03 sphères.

- 02 cigares et une sphère pour l'azote pur.
- 14 cigares et 2 sphères pour l'oxygène pur.

Capacité de stockage :

Les produits gazeux :

- Oxygène 99,75 m³
- Azote 20,25 m³

Les produits liquides :

- Oxygène : 940 L
- Azote : 325 L
- Argon : 55 L

II.5 Généralités sur l'épuration

Si on ne prévoit aucun système d'élimination de la vapeur d'eau et du CO₂ gazeux, le passage de l'air risque de provoquer le bouchage progressif de l'échangeur par la glace et la neige carbonique.

Un système d'épuration est donc nécessaire pour assurer le fonctionnement continu de l'installation. D'autre part, il sera également nécessaire d'éliminer autant que possible les hydrocarbures présents à des concentration de quelques ppm dans l'air (acétylène, méthane, éthane, etc....) qui pourraient se concentrer dans les colonnes et provoquer avec l'oxygène des explosions.

II.5.1 Effets de la présence d'impuretés dans l'air sur le bon fonctionnement de la colonne à distiller [11]

En tenant compte de l'existence des impuretés (CO₂, humidité, hydrocarbure) dans l'air atmosphérique, il faut trouver un moyen capable d'éliminer ces substances. La conception d'un système d'épuration d'air étant difficile à réaliser et coûteuse.

Au début les initiateurs du projet central à oxygène ont utilisé les caractéristiques même de ces impuretés pour s'en débarrasser c'est-à-dire que le CO₂ et l'humidité sont débarrassés dans le revex en phase gazeuse et hydrocarbures sont éliminés en phase

liquide à travers des filtres, mais ce procédé d'épuration de l'air devient moins efficace, donc il a été remplacé par tamis moléculaire adsorbants.

Le dioxyde de carbone et l'humidité contenus dans l'air sont considérés comme des dangers pour la sécurité de l'installation puisqu'ils sont susceptibles de former des dépôts solides (de se cristalliser) : c'est-à-dire passer de la phase vapeur inerte à une phase solide pouvant causer de gros problèmes de fonctionnement.

Si les deux produits suscités étaient demeurés en phase gazeuse pendant toute l'opération du fractionnement de l'air, ils n'auraient été d'aucun problème pour le déroulement du procédé, le dioxyde de carbone et l'humidité vont voir leur températures s'abaisser jusqu'à atteindre celles de leur cristallisation ; celle-ci survient là où sont atteintes les plus basses températures : dans les échangeurs revex, dans le bain d'oxygène liquide (bloc condenseur) Ainsi que dans les plateaux de la colonne à distiller.

L'accumulation avec le temps de ces cristaux va provoquer l'encrassement des parois internes des échangeurs revex, ce qui entraîne à long terme la diminution du débit d'air, cet encrassement devient de plus en plus important jusqu'à former un dépôt solide d'épaisseur grandissante. Ce dépôt aura tendance à faire diminuer la distance d'échange de chaleur, ce qui conduit à une répartition inégale du gradient de température à l'intérieur du conduit d'air ce mauvais échange de chaleur induira une difformité du dépôt solide va entraîner un arrachement de cristaux du dioxyde de carbone et d'eau lors du passage de l'air, qui les transporte vers la colonne à distiller où ils vont causer les bouchages des plateaux de la colonne et des plaques du condenseur.

Le méthane et surtout l'acétylène sont les véritables dangers extrêmes qu'encourent l'unité de fractionnement de l'air, en raison de la formation d'un mélange explosif lorsque leur concentration augmente dans le bain d'oxygène liquide. Le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau ayant été cristallisés au niveau des revex, l'air entrant dans la colonne à distiller n'est plus formé que d'azote, d'oxygène et d'hydrocarbures. Ces derniers n'atteignant pas leurs températures de liquéfaction, demeurent donc, en phase vapeur dans les différents liquides se trouvant dans la colonne ; c'est-à-dire dans le liquide riche en bas de (C1) et dans le bain d'oxygène liquide au niveau du bloc condenseur. Dans ce dernier, les cristaux de dioxyde de carbone et d'eau entraînés par l'air lors de son passage dans les revex, peuvent être la cause d'un encrassement des plaques du condenseur.

II.5.2 Epuration de l'air et élimination des impuretés

Il est nécessaire de refroidir l'air jusqu'à ce point de rosée, dans les échangeurs avant d'envoyer dans les colonnes à distiller. Car si on n'épure pas l'air, on constate au fur et à mesure de l'abaissement de sa température dans les échangeurs de chaleur :

- La condensation de vapeur d'eau, inévitablement présente dans l'air ;
- La solidification de l'eau liquide (glace) à 0 °C ;
- La condensation du CO₂ gazeux (apparition de neige carbonique)

Donc, si on ne prévoit aucun système d'élimination de la vapeur d'eau et de CO₂ gazeux, le passage de l'air peut provoquer le bouchage progressif de l'échangeur par la

glace et la neige carbonique ; un système d'épuration est donc nécessaire pour assurer la continuité du fonctionnement d'une l'installation.

Pour cela, utilise deux pré-épurateurs à tamis moléculaire, chaque pré-épurateur est étudié de façon à éliminer les impuretés du volume entier d'air de l'installation tandis que l'autre est en régénération.

Toute l'humidité et l'anhydride carbonique sont éliminés dans l'air. La dimension des pré-épurateurs et le temps de régénération sont bases sur la capacité des tamis à retenir l'humidité et l'anhydride carbonique.

II.5.3 Principe de l'épuration par adsorption

Il est important de distinguer la différence entre l'adsorption et l'absorption, la première consistant en la fixation sur la surface d'un solide appelé adsorbant, des molécules d'un gaz ou d'un liquide, alors que la deuxième consiste à la pénétration au niveau des molécules d'un gaz ou d'un liquide avec un autre corps par exemple solide.

L'adsorption étant un phénomène de surface, il sera réversible. Tous les corps solides possèdent un pouvoir adsorbant plus ou moins élevé, suivant leur nature, leur état de surface (porosité), et la nature du gaz adsorbé.

Dès que la surface du corps adsorbant est recouverte d'une couche de la molécule de corps adsorbé, la fixation s'arrête ; ainsi plus la surface du corps adsorbant est grande, plus la quantité adsorbée est grande, ceci est dû à la porosité de l'adsorbant.

II.5.4 Epuration par adsorption « en tête»

L'épuration par adsorption ou épuration en tête n'a pas que le rôle d'épuration contrairement aux échangeurs réversibles. L'épuration en tête sera assurée par l'échangeur simple, c'est-à-dire non réversible et à passage fixe.

II.6 Notion de l'adsorption

Il est important de différencier l'adsorption de l'absorption, la première consiste à la fixation à la surface d'un solide appelé adsorbant des molécules d'un gaz ou d'un liquide, alors que la deuxième consiste en la pénétration de la molécule d'un gaz ou d'un liquide avec un autre corps.

L'adsorption solide-gaz est un phénomène spontané lorsque l'on met en contact un gaz quelconque avec un solide, on observe donc que la concentration du gaz au voisinage du solide est plus élevée que dans la masse du gaz. La molécule gazeuse peut être déposée sur la surface du solide ou alors pénétrer à l'intérieur des interstices (vide inter moléculaire ou inter atomique) du solide.

L'adsorption est un phénomène réversible lorsque toute molécule de gaz adsorbée peut être rejetée à l'extérieur des pores du solide. Le phénomène inverse de l'adsorption est « la désorption ». Il existe deux types d'adsorption : l'adsorption chimique et l'adsorption physique.

- a) L'adsorption chimique: ou « chimisorption », elle a lieu lorsque la particule gazeuse forme une liaison covalente forte avec les molécules de la surface du solide.
- b) L'adsorption physique : pour ce deuxième, il n'y a pas de liaison chimique entre les molécules adsorbées et le solide ; les molécules gardent leur individualité ; c'est un état d'équilibre entre les molécules adsorbées et les molécules gazeuses dû à des forces d'attraction entre le solide et le gaz (forces de VANDER WAALS) On peut assimiler l'état adsorbé à l'état condensé, ce type d'adsorption ne peut se faire qu'en multicouches.

II.6.1 Sélectivité des adsorbants

Pour qu'il y ait adsorption, il faut qu'il y ait attraction entre les molécules du corps ou impuretés à adsorber et la surface de l'adsorbant. De plus il faut que le diamètre des impuretés adsorbées soit inférieur à celui des pores de l'adsorbant qui joue un rôle de piège à molécules. Ainsi, selon la nature de l'adsorbant et celle de l'impureté à adsorber, on définit une sélectivité des adsorbants.

| Impuretés | Adsorbants | |
|-----------------|------------|----------------|
| | Alumine | Zéolites (13X) |
| Eau | * | * |
| CO ₂ | | * |
| Hydrocarbures | | * |
| Oxyde d'azote | | * |
| ozone | | * |

Tableau II.1 : Sélectivité des adsorbants.

Le méthane et l'éthane sont très mal adsorbés, par contre l'acétylène (molécule très insaturée) est très bien arrêté. A partir du propane, les autres hydrocarbures sont tous assez bien arrêtés. Les capacités d'adsorption des impuretés H₂O et CO₂ sur différents adsorbants sont illustrées par les courbes isothermes des gaz purs. Pour la décarbonatation il apparaît clairement que le tamis moléculaire (13X) est l'adsorbant de choix.

La dessiccation par alumine ou dessiccation par 13X sont effectivement utilisées en épuration d'air. On préfère cependant l'effectuer par l'alumine.

Trois raisons principales motivent ce choix :

- L'alumine est moins sensible aux impuretés de second ordre souvent de type acide, elle joue un rôle de protection du lit du tamis placé à la suite pour arrêter le dioxyde de carbone.
- L'alumine sera plus facilement régénérable que le tamis, chaleur de désorption plus faible à quantité adsorbée. En contrepartie, l'alumine vieillit plus fortement que le tamis et la masse d'alumine à mettre en place sera plus relevée que la masse correspondante du tamis.

II.7 Procédé de distillation de l'air

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

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

L'air devenu liquide est remonté dans une colonne de distillation pour séparation d'azote.

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

Un circuit complémentaire constitué d'un compresseur et de turbines de détente permet de liquéfier l'azote gazeux accumulé en tête de colonne, à ce moment-là la pureté de l'azote est de 99,95%.

Dans le bas de la colonne, il reste un « liquide riche » à forte teneur en oxygène et argon. Ce liquide passe dans une colonne basse pression qui présente des conditions pression/température différentes.

Dans cette colonne, les résidus d'azote sont évacués ; après cette seconde distillation, l'oxygène est pur à 99,6%.

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

II.7.1 Modèle de simple colonne

Dans une colonne on peut obtenir l'un des produits aussi purs qu'on le désire en fonction du nombre de plateaux et de quantité soutirée.

En utilisant un mélange d'oxygène et d'azote ; on obtient de façon schématique le résultat suivant (Fig.II.7)

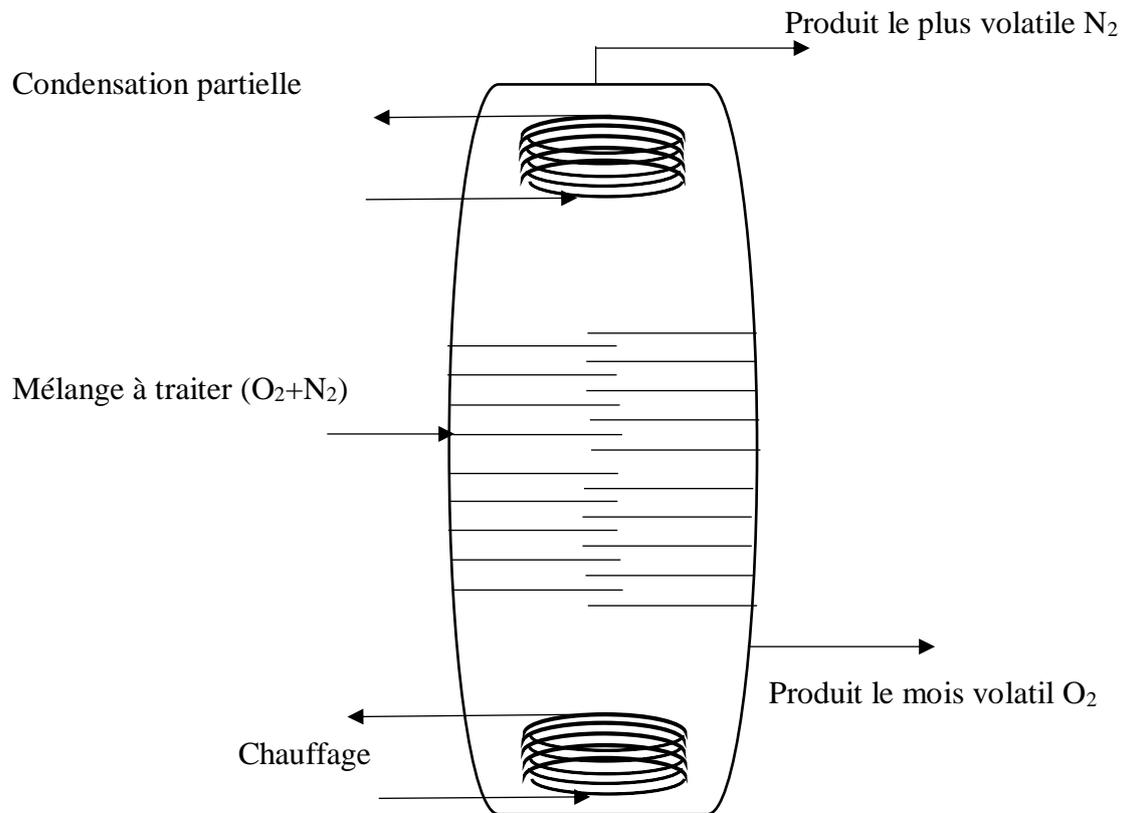


Figure II .8 : Simple colonne.

- L'inconvénient de cette colonne est qu'elle nécessite la présence d'un chauffage et d'un condenseur.
- Pour produire de l'azote, il nous faut un condenseur en tête de colonne.
- L'oxygène est produit au pied de la colonne.
- on sait que pour condenser un gaz, il faut lui soutirer de la chaleur et que pour vaporiser un liquide il faut lui apporter de la chaleur, donc on peut vaporiser l'oxygène liquide grâce à la chaleur soutirée à l'azote, qui aussi condenserait.

II.7.2 Méthode de la double colonne

Pour une meilleure distillation à deux colonnes :

- L'air gazeux serait injecté en bas de la colonne et subirait une séparation pour donner un reflux.
- Une condensation devrait être faite par échange de chaleur avec l'oxygène liquide qui serait vaporisée.
- Cet oxygène liquide serait en cuve d'une deuxième, aurait pour résiduaire un mélange vapeur d'azote et d'oxygène.

Phénomène d'évaporation et de condensation :

- La première distillation se fait à la pression atmosphérique ; la seconde se fait à basse pression.

II.7.3 Déroulement des phénomènes d'évaporation et de condensation

A partir du fractionnement de l'air atmosphérique, on obtient les deux éléments oxygène et azote sous leurs deux phases avec le maximum de pureté.

L'air subit deux fonctionnements successifs dans une double colonne à distiller (FIG II.9).

La première distillation se fait à la pression atmosphérique, la seconde se fait à basse pression.

la composition principale de cette double colonne est un bloc condenseur-évaporateur qui garantit l'apport de l'énergie nécessaire à toute distillation, cet apport est le résultat de changement de phase de l'azote et l'oxygène (la chaleur latente) c'est-à-dire que l'azote gazeux (le plus volatil) obtenu par la pré-distillation de l'air entre dans la première colonne (C1) constitue un rebouilleur pour la deuxième colonne (C2) et se condense au contact du bain d'oxygène liquide pour fournir les calories nécessaire à l'évaporation de l'oxygène liquide, et donc satisfaire les besoins en production d'oxygène gazeux.

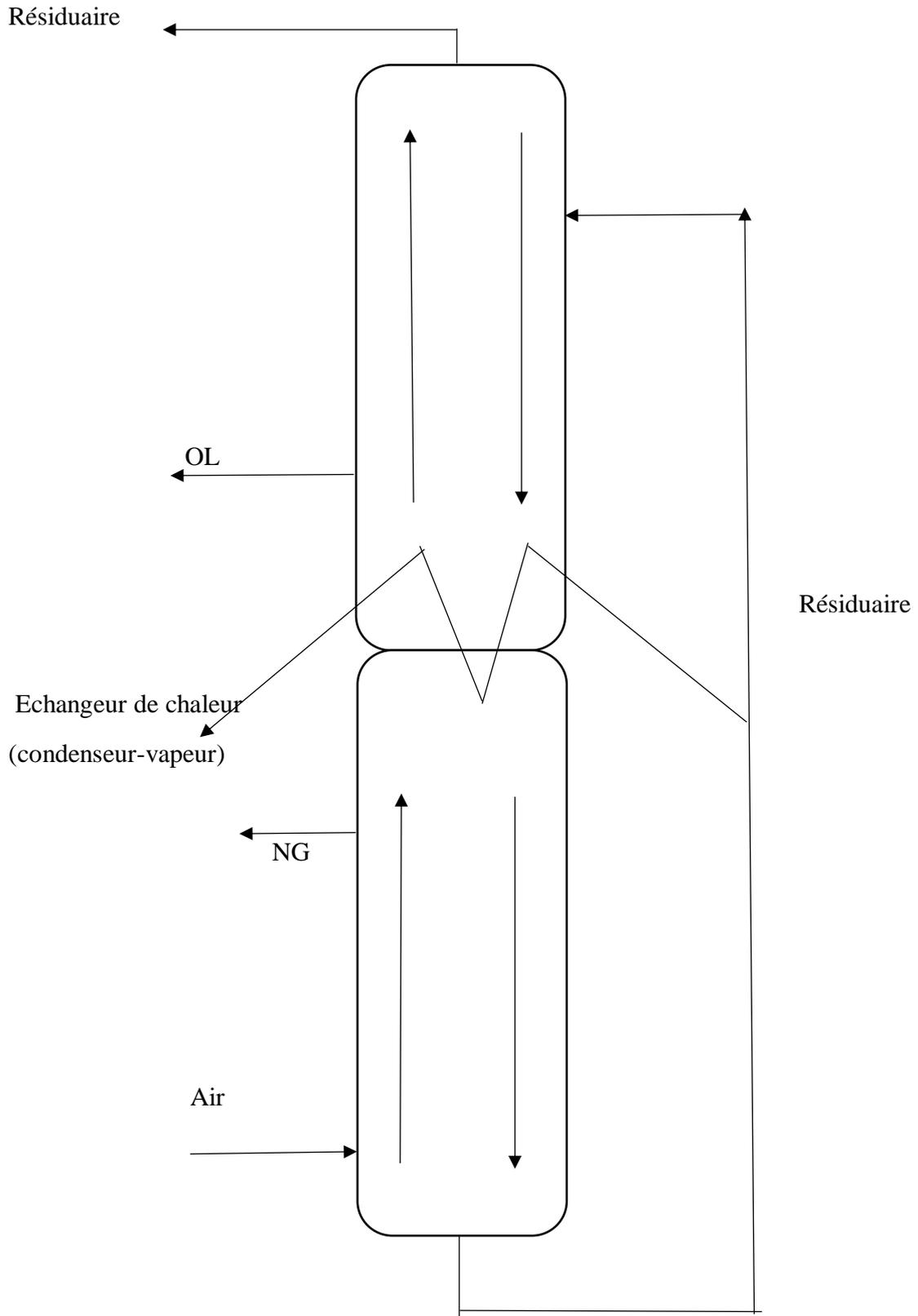


Figure II.9 : Schéma de la double colonne de distillation.

L'oxygène liquide recueilli en bas de la haute colonne (C2) est extrait de l'air liquide soutiré. De la première colonne (C1), entre ces 02 colonne, est disposé un bloc condenseur où l'azote se condense dans le ballon rebouilleur en tête de la colonne de pré-distillation sous l'effet des frigories fournies par l'oxygène qui va s'évaporer.

Donc, en réalité cet élément est considéré comme un condenseur qu'un rebouilleur car l'échange entre les deux fluides aboutit à l'évaporation de l'oxygène liquide et la condensation de l'azote gaz.

Plusieurs facteurs influents sur le choix de la pression au niveau des deux colonnes (C1), (C2) la raison du choix de la pression atmosphérique comme pression de la deuxième colonne (C2) est du stockage du produit liquide soutiré au niveau de cette colonne. Le condenseur contient l'azote gaz saturé à une pression partielle équivalente à sa tension de vapeur à la température de (-181°C), l'oxygène liquide.

A la même température de l'oxygène (-183°C) la condensation de l'azote s'effectue à une pression de 1.4 bar donc l'azote gaz à besoin de céder 2 degrés pour se condenser. Cette phase est celle où l'oxygène liquide saturé s'évapore dans le rebouilleur au contact de l'azote chaud.

Ainsi les conditions opératoires qui permettent d'assurer la bonne distillation sont :

- L'oxygène liquide dans la colonne basse pression se trouve à une pression supérieure à celle atmosphérique du fait des pertes de charge dans cette colonne.
- Dans l'échangeur de chaleur qu'est le vaporiseur-condenseur par construction, il existe un écart de température entre l'oxygène liquide et l'azote gazeux.

Pour une pression de 1.4 bar en cuve de colonne basse pression la température correspondante d'ébullition de l'oxygène liquide est (-179°C), si l'écart de température est de 2°C dans l'échangeur sachant que l'échange de chaleur va de l'azote gazeux moyenne pression vers l'oxygène liquide basse pression, la température de l'azote gazeux est par conséquent plus élevée que celle de l'oxygène liquide soit (-177°C), la pression correspondante de l'azote gazeux est 5,6 bar.

II.8 Tamis moléculaire [8]

Les tamis moléculaire (Fig.II.10) sont considérés comme des matériaux microporeux, Généralement assimilés aux zéolites et traditionnellement connus comme ayant une porosité régulière ; ils sont très stables chimiquement et thermiquement.

Les matériaux microporeux sont, le plus souvent, des minéraux est parfois des substances organique, dont la structure n'est pas compacte, et comporte un certain volume libre interne et des pores de dimension proches de celles des molécules. Pour les matériaux organiques la porosité est due dans la plupart des cas à la présence de polymères ramifiés selon plusieurs directions et à l'enchevêtrement de ces molécules polymérique.

II.8.1 Utilisation des tamis moléculaires

Les propriétés et les utilisations des zéolites ont été explorée dans beaucoup de disciplines scientifiques principalement la chimie organique et la cristallographie.

Cette large variété d'application des tamis moléculaire zéolitiques, inclue : la séparation et la récupération de paraffines d'hydrocarbures, la séparation des composés d'air, l'obtention d'ions radioactifs à partir des solutions radioactifs, l'élimination de dioxyde de carbone et des composés sulfurés dans le gaz naturel, le cryopompage, la solubilisation d'enzyme, la séparation d'isotopes d'hydrogène et élimination de polluants atmosphériques tels que le dioxyde de soufre.

Les adsorbants commerciaux qui présentent une ultra porosité et qui sont généralement utilisés pour la séparation de gaz et de mélange de vapeur, incluent : le charbon actifs, les terres activées les gels non organique tel que le silicat gel et l'alumine activée ainsi que les aluminosilicates (zéolites).

Le charbon actif, l'alumine activée et le silicat gel ne possèdent pas de réseaux cristallins ordonnés et par conséquent leurs pores ne sont pas uniformes. La distribution des diamètres des pores à l'intérieur des particules de l'adsorbant peut être de l'ordre de 20 à 50 Å ou elle peut être comprise entre 20 et plusieurs milliers d'Angstrom comme c'est le cas dans plusieurs charbons actifs. Les tamis moléculaires zéolitiques ont des pores de dimension uniforme (3 à 10 Å) qui sont uniquement déterminées par la structure d'une seule parmi les unités du cristal. Ces pores vont complètement exclure les molécules plus larges que leur diamètre.

Bien que les tamis moléculaires ont de nos jours des applications diverses comme les réactions catalytique ou les réactions d'échange d'ions, il reste que le terme « tamis moléculaire » est toujours retenu même s'il n'implique pas toute cette large gamme d'application. La catalyse stéréospécifique et le comportement d'ion tamis sont aujourd'hui bien connus.

Les zéolites ont d'abord été décrites par Cronstedt comme un groupe de minéraux constitué d'aluminosilicates hydratés et de terre alcaline. Après sa découverte de la stilbite en 1756.

Comme cette substance minérale devenait fluorescente lorsqu'elle était chauffée par une flamme dans une sarbacane, il a appelé zéolite, mot provenant de deux termes grecs voulant dire : « zeo » = bouillir et « lit » = pierre.

J.V Smith définit les zéolites comme étant des aluminosilicates avec une charpente poreuse et une charge négative comportant des cavités occupée par des cations et des molécules d'eau, ces dernières ont un mouvement considérable, ainsi l'échange d'ions et la déshydrations réversible.

De par leurs stabilités chimique et thermique, les zéolites se sont imposées dans un grand nombre de technologies faisant Apple à l'adsorption et à la purification des gaz et à la catalyse pétrochimique à hautes températures.

II.8.2 Notion de vieillissement

Par vieillissement de l'adsorbant, on saisit toute dégradation du produit qui a pour conséquence d'en réduire la capacité d'adsorption soit :

- De façon irréversible (changement de structure de l'adsorbant).
- Ou bien sans possibilité de récupération par les techniques classique de régénération.

L'alumine en particulier vieillit dès les premiers cycles sous l'action principalement de traitement hydro thermique. On tient compte du vieillissement de l'adsorbant. En majorant la masse d'adsorbant calculée sur la base d'un produit neuf, par un coefficient qui dépend de la nature de l'adsorbant et des conditions d'utilisation en adsorption. Ce coefficient est généralement compris entre 1.1 et 1.3 pour le tamis moléculaire, et peut atteindre 2 pour l'alumine.

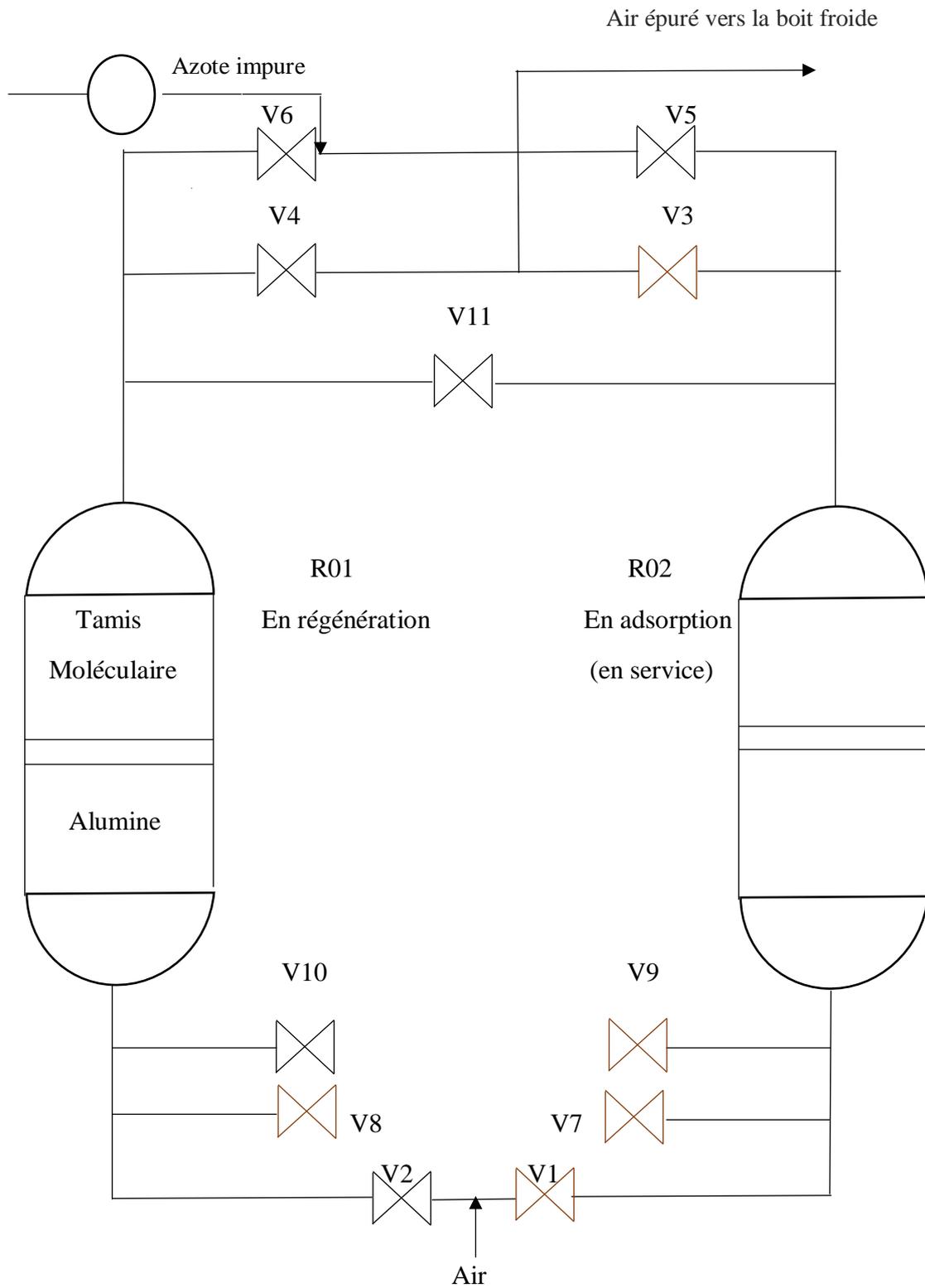


Figure II.10 : Tamis moléculaire

CHAPITRE III

Partie calcul

III.1 Introduction

L'air comprimé à une température de 93°C, et doit être refroidi jusqu'à une basse température de 11°C favorable au fonctionnement des adsorbants au niveau des tamis moléculaires en passant par la tour de lavage pour être déshumidifiée. La détermination des différents débits du système de refroidissement de l'unité fera l'objet de ce chapitre.

III.2 Calcul des débits de refroidissement de l'air du procédé

Afin d'éviter la dégradation de la matière adsorbante des tamis moléculaires et sachant que le phénomène d'adsorption physique (la physisorption), et favorisé par les basses températures, l'air doit nécessairement être refroidi à la suite de sa compression jusqu'à une température favorable au bon fonctionnement des adsorbants.

L'air saturé à la température de 93°C va être refroidi et partiellement déshumidifié dans une tour de lavage à eau jusqu'à la température de service du tamis moléculaire de 13°C environ. La tour de lavage est une colonne à garnissage où le refroidissement de l'air se fait à contre-courant avec l'eau froide qui pénètre en haut de la colonne et l'air chaud introduit en bas de la colonne. Si on divise le garnissage de la colonne en plateaux de nombre égale à une subdivision fictive de l'intervalle de température de l'air (entrée, sortie) on aura à chaque plateau de température deux phénomènes qui ont lieu simultanément :

-pour l'air, il en résultera une condensation de la vapeur d'eau qu'il contient, suivie d'une saturation de ce même air par la vapeur dégagée de refroidissement lui permettant un gain de frigories.

-pour l'eau, on aura un réchauffement par l'air du procédé jusqu'à évaporation. Cette eau et la vapeur d'eau condensée initialement contenue dans l'air formeront les débits de sortie de refroidissement.

L'air refroidi et lavé se dirige alors vers les adsorbants avec une humidité résiduelle à éliminer. Le lavage de l'air se réalisera par deux débits d'eau : une eau à température ambiante 25°C et l'autre à une température plus basse environ 11°C en provenance de la colonne de refroidissement de l'eau par azote impur. Ces deux débits d'eau sont introduits à des niveaux différents de la colonne.

L'eau à température ambiante introduite à un certain niveau de l'entrée d'air se dirige vers le haut de la colonne l'air où elle rencontre la deuxième eau de refroidissement introduite à un niveau supérieur du premier niveau d'eau.

Une motivation économique explique le choix de refroidir avec 02 eaux à températures différentes, ramener l'air de sa température initiale environ 93°C à une température de 11°C avec un seul débit à très basse température aurait nécessité un débit très élevé, lequel exige une dépense énorme d'énergie pour son refroidissement.

Dans la colonne de refroidissement d'eau, ce sont les échanges de chaleur latente (largement supérieure à ceux des chaleurs sensibles) qui provoquent le refroidissement de l'eau jusqu'à la température désirée environ 11°C et le réchauffement de l'azote sec depuis sa température d'entrée estimée à 16°C (l'azote

après avoir été utilisé comme un réfrigérant dans le revex) jusqu'à celle de sa sortie à 30°C à l'état saturé en haut de la colonne.

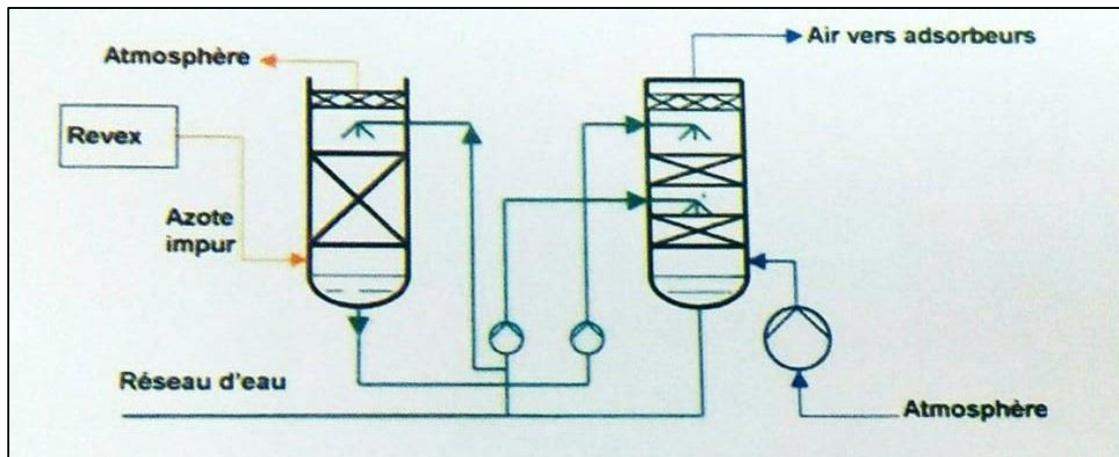


Figure III.1 : schéma du principe de lavage de l'air

III.3 Calcul du débit d'azote de la colonne de refroidissement [12,13]

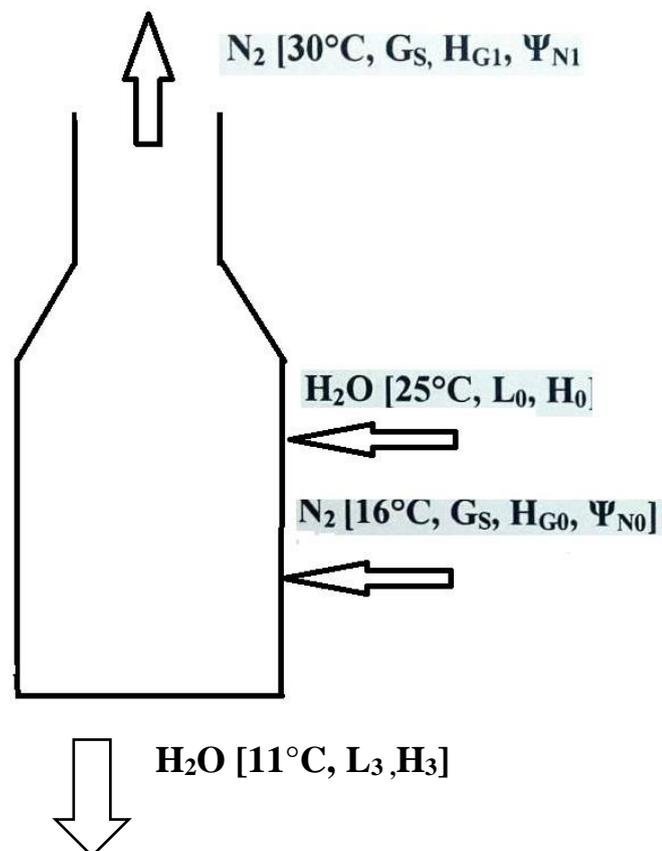


Figure III .2 : Schéma de la colonne de refroidissement de l'eau par l'azote impure

III.3.1 Bilan massique et enthalpique de la colonne de refroidissement :

Bilan massique :

Le bilan massique de l'eau à travers la colonne permet d'écrire :

$$L_0 + G_S \varphi_{NO} = L_1 + G_S \cdot \varphi_{N1} \quad (1)$$

L_0 : débit d'eau à l'entrée de la colonne [kg/h].

L_1 : débit d'eau à la sortie de la colonne [kg/h].

G_S : débit d'azote sec [kg/h].

φ_{NO} : humidité absolue d'azote à l'entrée [kg H₂O/kg d'azote sec].

φ_{N1} : humidité absolue d'azote à sortie [kg H₂O/kg d'azote sec].

En considérant que l'azote entre sec (sans humidité) dans la colonne, donc $\varphi_{NO} = 0$

$$L_0 = L_1 + G_S \cdot \varphi_{N1} \quad (2)$$

Bilans enthalpique :

$$L_0 \cdot H_0 + G_S \cdot H_{G0} = L_1 \cdot H_1 + G_S \cdot H_{G1} \quad (3)$$

H_0 : enthalpie de l'eau à l'entrée de la colonne [kcal/kg d'eau].

H_1 : enthalpie de l'eau à la sortie de la colonne [kcal/kg d'eau].

H_{G0} : enthalpie de l'azote à l'entrée de la colonne [kcal/kg d'azote].

H_{G1} : enthalpie de l'azote à la sortie de la colonne [kcal/kg d'azote].

Des équations (2) et (3) on obtient :

$$G_S = L_1 (H_0 - H_1) / (H_{G1} - H_{G0} - \varphi_{N1} \cdot H_0) \quad (4)$$

La valeur du débit est inconnue dans cette équation.

III.4 Calcul des débits d'eau de refroidissement au niveau de la colonne de lavage :

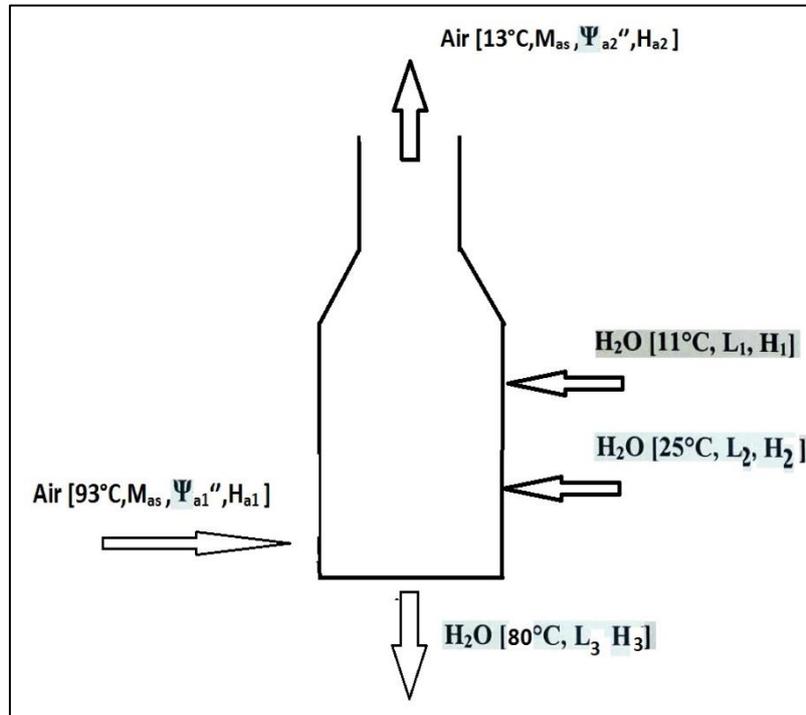


Figure III.3 : Schéma de la colonne de lavage de l'air.

Bilans matière :

Le bilan massique de l'eau à travers la colonne permet d'écrire :

$$L_1 + L_2 + M_{AS} \cdot \Psi_{a1}'' = L_3 + M_{AS} \cdot \Psi_{a2}'' \quad (5)$$

L_1 : débit d'eau à 11°C à l'entrée de la colonne de lavage.

L_2 : débit d'eau à 25°C à l'entrée de la colonne de lavage.

L_3 : débit d'eau à 80°C à la sortie de la colonne de lavage.

M_{AS} : débit d'air sec [kg air sec/h]

Ψ_{a1}'' : humidité saturante à l'entrée de la colonne de lavage [kg H₂O/kg air sec].

Ψ_{a2}'' : humidité saturante à la sortie de la colonne de lavage [kg H₂O/kg air sec].

Bilans enthalpique :

D'après le principe de conservation de la chaleur :

$$L_1 H_1 + L_2 H_2 + M_{AS} H'_{a1} = L_3 H_3 + M_{AS} H'_{a2} \quad (6)$$

H_1 : enthalpie de l'eau à 11°C à l'entrée de la colonne de lavage [kJ/kg H₂O].

H_2 : enthalpie de l'eau à 25°C à l'entrée de la colonne de lavage [kJ/kg H₂O].

H_3 : enthalpie de l'eau à 80°C à la sortie de la colonne de lavage [kJ/kg H₂O].

H'_{a1} : enthalpie de l'air à 93°C à l'entrée de la colonne de lavage.

H'_{a2} : enthalpie de l'air à 13°C à la sortie de la colonne de lavage.

Les équations (5) et (6) ne permettent pas de calculer le débit d'eau cherché L_1 , car on a trois inconnues : L_1 , L_2 , L_3 . Pour diminuer le nombre d'inconnues, on divisera la colonne de lavage en deux parties de façon à n'avoir qu'un seul débit d'eau dans chaque partie. La résolution des équations bilans relatives à ces parties. Déterminera les débits inconnus. On vérifiera par une itération l'exactitude de la solution, par la suite, plusieurs itérations seront faites jusqu'à ce que le bilan de l'équation (6) soit vérifié.

Les itérations porteront sur les températures intermédiaires du partage fictif ainsi créé dans la colonne de lavage. Ce partage correspond à un plateau où l'on considère que l'air et l'eau s'y croisent sont à la même température.

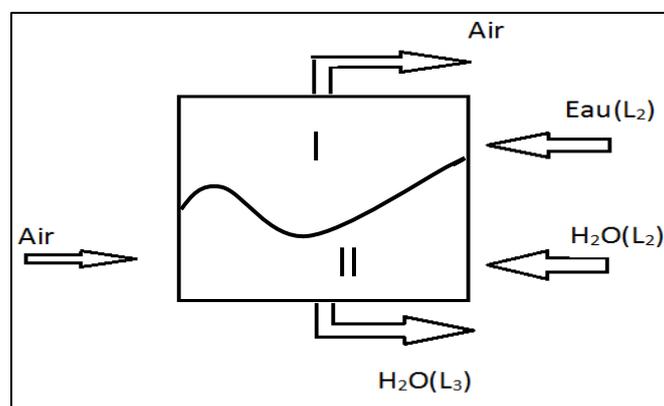
III.4.1 Partage de la colonne de lavage

Figure III.4 : schéma du partage de la colonne de lavage.

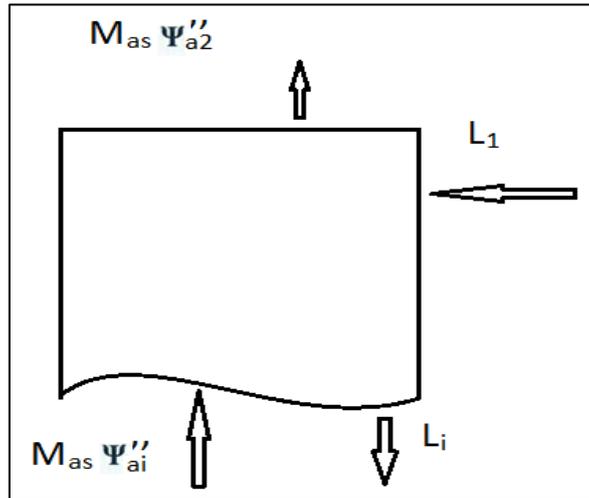
Bilan de la partie I :

Figure III.5 : Schéma de la partie supérieure I de la colonne de lavage.

Bilan massique :

$$L_1 + M_{AS} \Psi''_{ai} = L_i + M_{AS} \Psi''_{a2} \quad (7)$$

L_i : débit d'eau à l'interface.

Ψ''_{ai} : humidité absolue saturante à l'interface.

$$L_i = L_1 - M_{as} (\Psi''_{a2} - \Psi''_{ai}) \quad (8)$$

Bilan enthalpique :

$$L_1 H_1 + M_{as} \cdot H_{ai} = L_i H_i + M_{as} \cdot H'_{a2} \quad (9)$$

H_{ai} : enthalpie de l'air à l'interface.

H_i : enthalpie à l'interface de l'eau.

En substituant l'équation (8) dans l'équation (9), on aura :

$$L_1 = M_{as} [(H'_{a2} - H_{ai}) - H_i (\Psi''_{a2} - \Psi''_{ai})] / (H_1 - H_i) \quad (10)$$

A $T_0 = 273^\circ\text{k}$ (température de référence), les expressions des enthalpies sont les suivantes :

$$H'_{a2} = C_{p_{air}}(T_{a2} - T_0) + \Psi''_{a2} [C_{p_{vap}}(T_{a2} - T_0) + L_{vT0}]$$

$$H_{ai} = C_{p_{air}}(T_{ai} - T_0) + \Psi''_{ai} [C_{p_{vap}}(T_{ai} - T_0) + L_{vT0}]$$

$$H_i = C_{p_{liq.}}(T_i - T_0)$$

$$H_1 = C_{p_{liq.}}(T_1 - T_0)$$

$C_{p_{air}}$: capacité calorifique de l'air à la température T_{a2}

$C_{p_{vap}}$: capacité calorifique de vapeur d'eau à la température T_{a2}

$C_{p_{liq.}}$: capacité calorifique de l'eau à la température T_i

L_{vT0} : chaleur latente de condensation de vapeur d'eau à T_0

Bilan de la partie II :

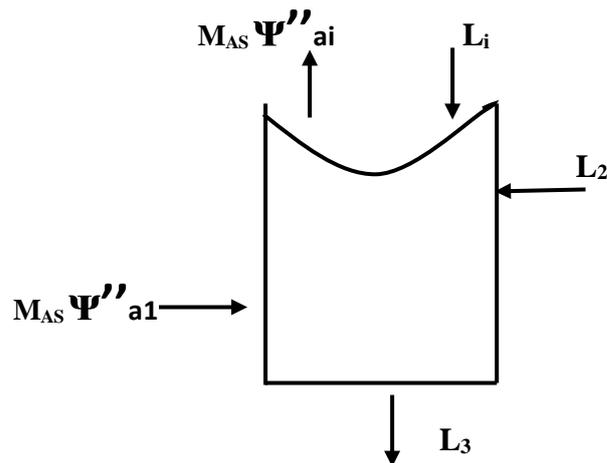


Figure .III 6 : Schéma de la partie inférieure II de la colonne de lavage.

Bilan massique :

$$L_2 + L_i + M_{AS} \Psi''_{ai} = L_3 + M_{AS} \Psi''_{a1} \quad (11)$$

$$L_3 = (L_2 + L_i) - M_{AS}(\Psi''_{ai} - \Psi''_{a1}) \quad (12)$$

Bilan enthalpique :

$$L_2 H_2 + L_i H_i + M_{AS} H'_{a1} = L_3 H_3 + M_{AS} H'_{ai} \quad (13)$$

En combinant l'équation (12) et (13), on trouve :

$$L_2 = M_{AS} [(H_{ai} - H'_{ai}) - H_3(\Psi''_{ai} - \Psi''_{a1}) / (H_2 - H_1)] - L_i [(H_i - H_3) / (H_2 - H_3)] \quad (14)$$

L'expression des enthalpies est :

$$H'_{a1} = C_{p_{air}}(T_{a1} - T_0) + \Psi''_{a1}[C_{p_{vap}}(T_{a1} - T_0) + l_{vT0}]$$

$$H_2 = C_{p_{liq}}(T_2 - T_0)$$

$$H_3 = C_{p_{liq}}(T_3 - T_0)$$

III.4.2 Détermination des grandeurs constantes

Les masses volumiques des liquides et des gaz ainsi que leurs capacités calorifiques et la pression saturante de la vapeur sont recueillies au niveau des tables thermodynamiques en annexe.

Calcul des humidités absolues saturantes :

A- Pour l'air (Fig.III.3) :

Entrée de l'air à 93°C :

$$\Psi''_{a1} = \left[\frac{P_{v''}}{P_t - P_{v''}} \right] \frac{M_{H_2O}}{M_{air}}$$

$$P_{v''} = 784.9 \text{ mbar (annexe 3)}$$

$$P_t = 7 \text{ bar}$$

$$\Psi''_{a1} = [784.9/7.10^3 - 784.9]18/29 = 0.0783 \text{ Kg d'H}_2\text{O/Kg d'air sec}$$

$$\Psi''_{a1} = 0.0783 \text{ Kg d'H}_2\text{O/Kg d'air sec}$$

Sortie de l'air à 13°C :

$$\Psi''_{a2} = \left[\frac{P_{v''}}{P_t - P_{v''}} \right] \frac{M_{H_2O}}{M_{air}}$$

$$\Psi''_{a1} = [14.97/(6.6 \cdot 10^3 - 14.97)]18/29 = 1.411 \cdot 10^{-3} \text{ Kg d'H}_2\text{O/Kg d'air sec}$$

$$\Psi''_{a2} = 1.411 \cdot 10^{-3} \text{ Kg d'H}_2\text{O/Kg d'air sec}$$

B-pour l'azote (Fig. III.2) :

Entrée de l'azote à 16°C : $\Psi''_{NO} = 0$ (l'azote entre dans la colonne à l'état sec)

Sortie de l'azote à 30°C : $\Psi''_{N1} = p''_v(30) / p_T - p''_v(30) M_{H_2O} / M_{N_2}$

$$\Psi''_{N1} = [42.41/7.2 \cdot 10^3 - 42.41] 18/28$$

$$\Psi''_{N1} = 3.81 \cdot 10^{-3} \text{ Kg H}_2\text{O/Kg azote sec}$$

Calcul des enthalpies :

A-Calcul des enthalpies de d'air

Entrée de l'air à : $T_{a1} = 93^\circ\text{C}$, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

$$H'_{a1} = C_{p_{air}}(T_{a1} - T_0) + \Psi''_{a1}[C_{p_{vap}}(T_{a1} - T_0) + LV_{T_0}]$$

Où la chaleur spécifique varie en fonction de la température :

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 ; (\text{annexe 1})$$

$$C_{p_{air}} = 1.0123 \text{ kJ/kg.K d'air sec}$$

$$C_{p_{vap}} = 1.8989 \text{ kJ/kg.K d'H}_2\text{O}$$

$$\Psi''_{a1} = 0.0783 \text{ kg d'H}_2\text{O/Kg d'air sec}$$

$$LV_{T_0} = 2500.29 \text{ KJ/Kg d'H}_2\text{O}$$

$$H'_{a1} = 1.0123 (93-0) + 0.0783 [1.8989 (93-0) + 2500.29]$$

$$H'_{a1} = 303.74 \text{ KJ/kg d'air sec}$$

Sortie de l'air à $T_{a2}=13^{\circ}\text{C}$:

$$H'_{a2} = C_{p_{\text{air}}}(T_{a2}-T_0) + \Psi''_{a2}[C_{p_{\text{vap}}}(T_{a2}-T_0) + LV_{T_0}]$$

$$C_{p_{\text{air}}} = 1.00066 \text{ kJ/kg.K d'air sec}$$

$$C_{p_{\text{vap}}} = 1.8649 \text{ kJ/kg.K d'H}_2\text{O}$$

$$\Psi''_{a2} = 1.411 \cdot 10^{-3} \text{ kg d'H}_2\text{O/kg d'air sec}$$

$$H'_{a2} = 16.57 \text{ kJ/kg d'air sec}$$

B-Calcul des enthalpies de l'eau au niveau de la colonne de lavage

Entrée de l'eau 1 à $T_1=11^{\circ}\text{C}$:

$$H_1 = C_{p_{\text{liq}}}(T_1 - T_0)$$

$$C_{p_{\text{liq}}} = 4.20 \text{ kJ/kg.K d'eau} \Rightarrow H_1 = (4.20)11 = 46.2 \text{ kJ/kg}$$

Entrée de l'eau 2 à $T_2=25^{\circ}$:

$$H_2 = C_{p_{\text{liq}}}(T_2 - T_0)$$

$$C_{p_{\text{liq}}} = 4.18 \text{ kJ/Kg.K d'eau} \Rightarrow H_2 = 104.5 \text{ KJ/kg d'eau}$$

Sortie de l'eau à $T_3=80^{\circ}\text{C}$:

$$H_3 = C_{p_{\text{liq}}}(T_3 - T_0)$$

$$C_{p_{\text{liq}}} = 4.192 \text{ kJ/kg.K d'eau} \Rightarrow H_3 = 335.40 \text{ kJ/Kg d'eau}$$

La vérification de l'équation suivante nous donne les débits exacts de l'eau de refroidissement de l'air :

$$A = L_1 \cdot H_1 + L_2 H_2 + M_{as} \cdot H'_{a1}$$

$$B = L_3 \cdot H_3 + M_{as} \cdot H'_{a2}$$

$$L_1 = ?$$

$$L_2 = ?$$

III.4.3 Calcul des grandeurs inconnues de l'équation(4) :

Après avoir déterminé le débit d'eau refroidie par l'azote, on peut à partir du calcul des autres inconnues de l'équation (4) le débit d'azote nécessaire au refroidissement de l'eau

Entrée de l'azote impure à $T_{G0} = 16^{\circ}\text{C}$:

$$H_0 = C_{pN_2}(T_{G0} - T_0) + \Psi'_{N1}[C_{p_{vap}}(T_{G0} - T_0) + LV_{T0}]$$

Puisque $\Psi'_{N1} = 0$

On aura $H_0 = C_{pN_2}(T_{G0} - T_0)$

On a à 16°C , $C_{pN_2} = 1,04406 \text{ kJ/kg.K}$ d'azote

$$H_{G0} = 16,65 \text{ kJ/kg d'azote sec}$$

Sortie de l'azote impure à $T_{G1} = 30^{\circ}\text{C}$:

L'humidité absolue de N_2 a été calculée

$$\Psi'_{N1} = 3.81 \cdot 10^{-3} \text{ Kg H}_2\text{O/Kg azote sec}$$

$$H_{G1} = C_p(T_{G2} - T_0) + \Psi''_{N1}[C_{p_{vap}}(T_{G1} - T_0) + LV_{T1}]$$

$C_{pN_2} = 1,04079 \text{ kJ/kg.K}$ d'azote

$C_{p_{vap}} = 1,857 \text{ kJ/kg.K}$ d'eau

$$H_{G1} = 66,37 \text{ KJ/kg d'azote}$$

Entrée de l'eau au niveau de la colonne de refroidissement à $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$:

$C_{p_{liq}} = 4,18 \text{ kJ/kg.K}$

$$H_0 = 104,5 \text{ KJ/Kg d'eau}$$

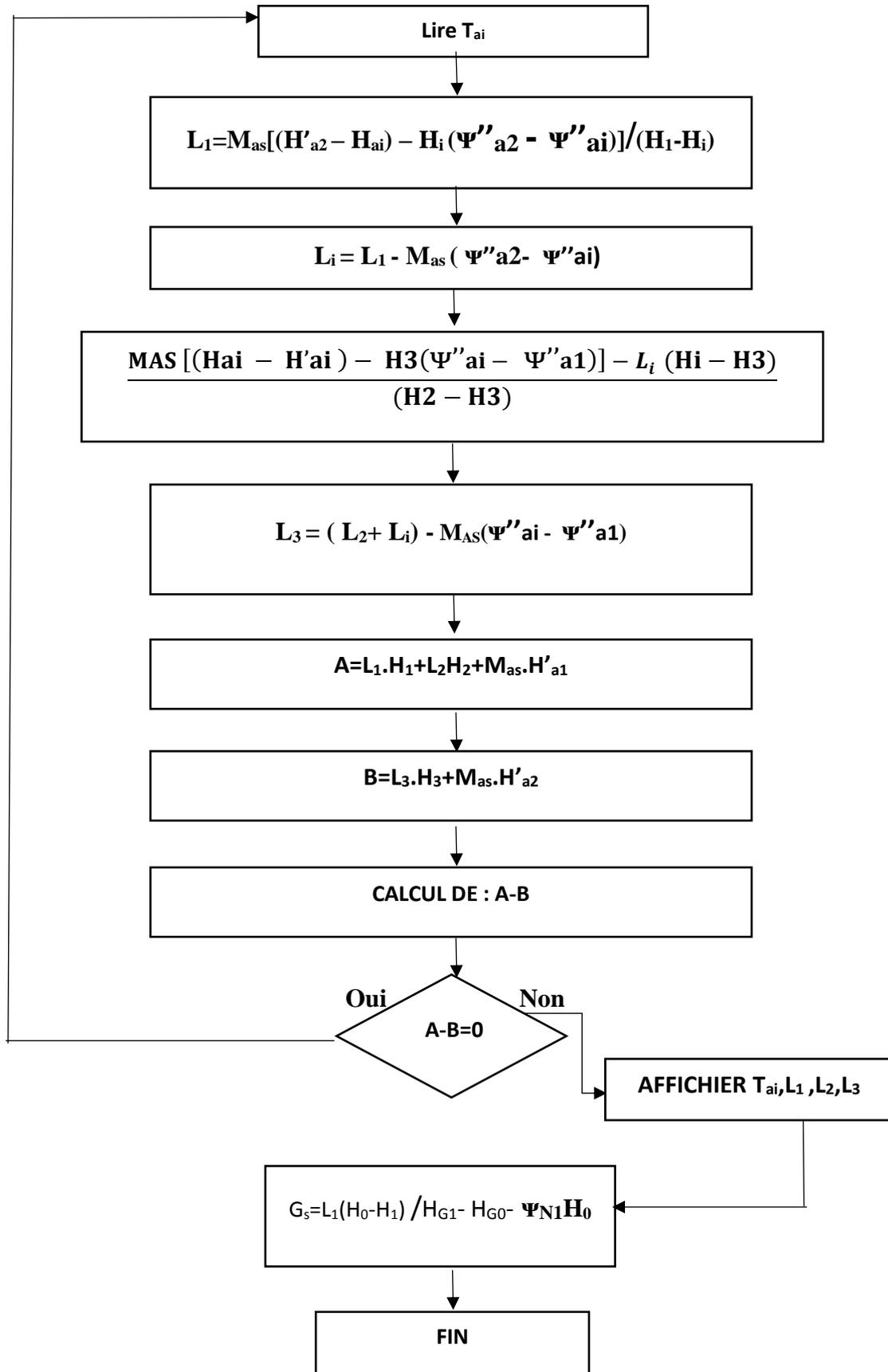
Sortie de l'eau de la colonne de refroidissement à $T_1 = 11^{\circ}\text{C}$:

$C_{p_{liq}} = 4,2105 \text{ kJ/kg.K}$ d'eau

$$H_1 = C_{p_{liq}}(T_{i1} - T_{i0})$$

$$H_1 = 46,31 \text{ kJ/kg d'eau}$$

III.4.4 Organigramme de calcul de la température de l'interface et des débits résultant du partage de la colonne en 2 parties distinctes



III.4.5 Programme de calcul de la température de l'interface et des débits résultant du partage de la colonne

```

clc
clear all
epsilon=0.001;
%entrée air
T0=0;
TG_1=93;
Cp_air_e=1.01123;
Cp_vap_e=1.898;
Lv=2500.29;
Psi_e=0.0783;
HG_1=Cp_air_e*(TG_1-T0)+Psi_e*(Cp_vap_e*(TG_1-T0)+Lv);
%sortie air
TG_2=13;
Cp_air_s=1.00066;
Cp_vap_s=1.864;
Psi_s=1.411e-3;
HG_2=Cp_air_s*(TG_2-T0)+Psi_s*(Cp_vap_s*(TG_2-T0)+Lv);
%entrée de l'eau
T1=11;
Cp_liq_T1=4.2;
H1=Cp_liq_T1*(T1-T0);
T2=25;
Cp_liq_T2=4.18;
H2=Cp_liq_T2*(T2-T0);
%sortie de l'eau
T3=80;
Cp_liq_T3=4.192;
H3=Cp_liq_T3*(T3-T0);
Mas=1292230.75;
%l'interface
T_ai=26;
Psi_ai=2.99e-3;
Cp_air_ai=10025;
Cp_vap_ai=1.8701;
Cp_liq_ai=4.18;
HG_ai=Cp_air_ai*(T_ai-T0)+Psi_ai*(Cp_vap_ai*(T_ai-T0)+Lv);
Hi=Cp_liq_ai*(T_ai-T0);
L1=Mas*((HG_2-HG_ai)-(Hi*(Psi_s-Psi_ai)))/(H1-Hi);
Li=L1-Mas*(Psi_s-Psi_ai);
L2=((Mas*((HG_ai-HG_1)-(H3*(Psi_ai-Psi_e))))-Li*(Hi-H3))/(H2-H3);
L3=(L2+Li)-Mas*(Psi_ai-Psi_e);
A=L1*H1+L2*H2+Mas*HG_1;
B=L3*H3+Mas*HG_2;
delta=A-B;
while delta<epsilon

```

```

TG_ai=T_ai+1;
Psi_ai=5.871e-3;
Cp_air_ai=0.2417;
Cp_vap_ai=0.443;
Cp_liq_ai=0.9982;
HG_ai=Cp_air_ai*(TG_ai-T0)+Psi_ai*(Cp_vap_ai*(TG_ai-T0)+Lv);
Hi=Cp_liq_ai*(TG_ai-T0);
L1=Mas*((HG_2-HG_ai)-(Hi*(Psi_s-Psi_ai)))/(H1-Hi);
Li=L1-Mas*(Psi_s-Psi_ai);
L2=((Mas*((HG_ai-HG_1)-(H3*(Psi_ai-Psi_e))))-Li*(Hi-H3))/(H2-H3);
L3=(L2+Li)-Mas*(Psi_ai-Psi_e);
A=L1*H1+L2*H2+Mas*HG_1;
B=L3*H3+Mas*HG_2;
delta=A-B;
end
HG_0=16.65;
Psi_N1=3.81e-3;
H0=104.5;
Gs=(L1*(H0-H1))/(HG_1-HG_0-Psi_N1*H0);

```

Résultats :

| T_i (°C) | A | B | (A-B) | L_1 kg/h | L_2 kg/h | L_3 kg/h | L_i kg/h | Gs kg/h |
|---------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|
| 25 | $5.1627 \cdot 10^7$ | $5.162 \cdot 10^7$ | $-7.4506 \cdot 10^{-9}$ | 34418 | 103210 | 147560 | 34600 | 69999.2 |
| 26 | $5.1574 \cdot 10^7$ | $5.1574 \cdot 10^7$ | 0.00 | 35046 | 102420 | 147400 | 35250 | 7126.8 |

Tableau III.1 : Températures de l'interface et débits de refroidissement obtenus.

Pour une température de l'interface $T_i=26^\circ\text{C}$, les débits d'eau sont :

$$L_1=35.046 \text{ m}^3/\text{h} \text{ et } L_2=102.420 \text{ m}^3/\text{h}$$

Le débit d'azote est : $G_s=7126.8 \text{ kg/h}$

$$\rho_{13^\circ}=1.184 \text{ Kg/m}^3 \Rightarrow G_s=6019.25 \text{ m}^3/\text{h}$$

III.4.6 Calcul du débit d'eau à l'interface de la colonne d'azote L_0 :

Le débit d'eau qui entre dans la colonne pour être refroidi par l'azote est donné par la formule suivante :

$$L_0=L_1+G_s \cdot \Psi_{N1}$$

$$L_0= 35.046+6019,25 \cdot 3,81 \cdot 10^{-3} =57.97 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$L_0 = 57,97 \text{ m}^3/\text{h}$$

III.5 Calcul sur l'Aéro-Réfrigérant au niveau de la centrale

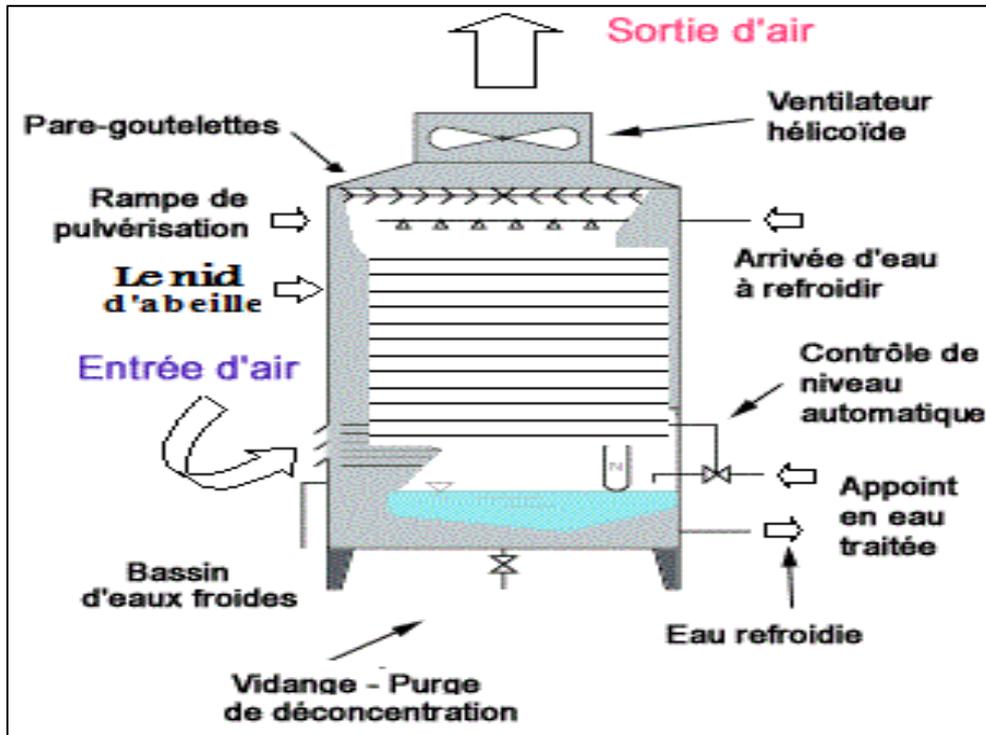


Figure III.7 Schéma de l'Aéro-réfrigérant à contact direct

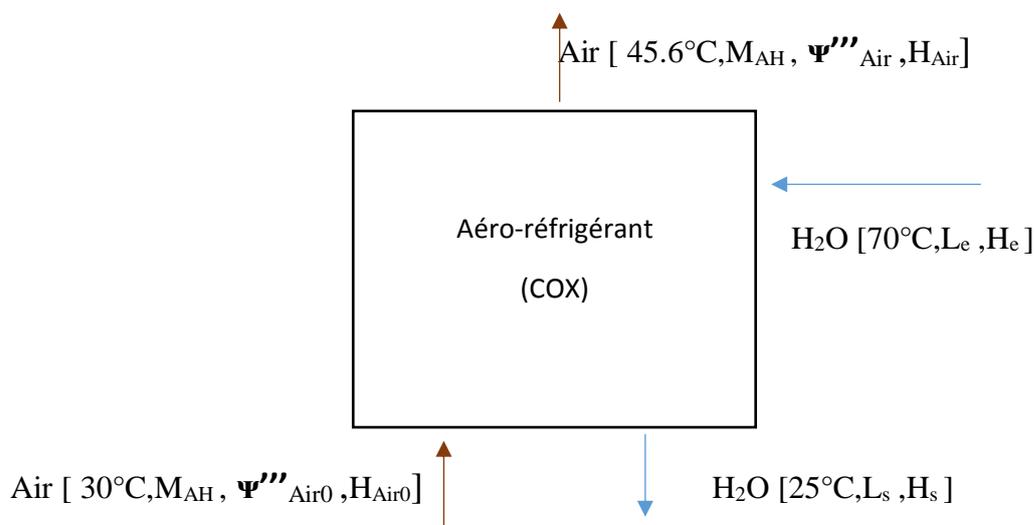


Figure III.8 Schéma simple d'Aéro-réfrigérant à contact direct

III.5.1 Bilan massique et enthalpique de l'Aéro-réfrigérant à contact direct

Bilans matière :

La conservation du débit à l'entrée et à la sortie de l'aéro-réfrigérant permet d'écrire ;

$$L_e + M_{AH} \cdot \Psi_{Air0}''' = L_s + M_{AH} \cdot \Psi_{Air}''' \quad (15)$$

L_e : débit d'eau à 70°C à l'entrée de l'aéro-réfrigérant

L_s : débit d'eau à 80°C à la sortie de l'aéro-réfrigérant.

M_{AH} : débit d'air sec [kg air sec/h]

Ψ_{Air0}''' : humidité saturante à l'entrée de l'aéro-réfrigérant [kg H₂O/kg air sec].

Ψ_{Air}''' : humidité saturante à la sortie de l'aéro-réfrigérant [kg H₂O/kg air sec].

$$L_s = L_e - M_{AH} (\Psi_{Air}''' - \Psi_{Air0}''') \quad (16)$$

Bilans enthalpique :

D'après le principe de conservation de la chaleur :

$$L_e H_e + M_{AS} H_{Air0} = L_s H_s + M_{AS} H_{Air} \quad (17)$$

H_e : enthalpie de l'eau à 70°C à l'entrée de l'aéro-réfrigérant [kJ/kg H₂O].

H_s : enthalpie de l'eau à 25°C à la sortie de l'aéro-réfrigérant [kJ/kg H₂O].

H_{Air0} : enthalpie de l'air à 30°C à l'entrée de l'aéro-réfrigérant.

H_{Air} : enthalpie de l'air à 45.6°C à la sortie de l'aéro-réfrigérant.

En substituant l'équation (15) dans l'équation (16), on aura :

$$L_e = M_{AH} [(H_{Air} - H_{Air0}) - H_s (\Psi_{Air}''' - \Psi_{Air0}''')] / (H_e - H_s) \quad (18)$$

A $T_0=273^{\circ}\text{k}$ (température de référence), les expressions des enthalpies sont les suivantes :

$$H_{\text{Air}} = C_{p_{\text{air}}}(T_{\text{Air}} - T_0) + \Psi_{\text{Air}}''' [C_{p_{\text{vap}}}(T_{\text{Air}} - T_0) + L_{v T_0}]$$

$$H_{\text{Air}0} = C_{p_{\text{air}}}(T_{\text{Air}0} - T_0) + \Psi_{\text{Air}0}''' [C_{p_{\text{vap}}}(T_{\text{Air}0} - T_0) + L_{v T_0}]$$

$$H_e = C_{p_{\text{liq}}}(T_e - T_0)$$

$$H_s = C_{p_{\text{liq}}}(T_s - T_0)$$

$C_{p_{\text{air}}}$: capacité calorifique de l'air à la température T_{Air}

$C_{p_{\text{vap}}}$: capacité calorifique de vapeur d'eau à la température T_{Air}

$C_{p_{\text{liq}}}$: capacité calorifique de l'eau à la température T_e

$L_{v T_0}$: chaleur latente de condensation de vapeur d'eau à T_0

III.5.2 Détermination des grandeurs constantes

Les masses volumiques des liquides et des gaz ainsi que leurs capacités calorifiques et la pression saturante de la vapeur sont recueillies au niveau des tables thermodynamiques en annexe.

III.5.3 Calcule d'humidité de l'air à l'entrée et la sortie

Entrée de l'air à 30°C :

$$\Psi_{\text{Air}0}''' = \left[\frac{P_{v''}}{P_t - P_{v''}} \right] \frac{M_{H_2O}}{M_{\text{air}}}$$

$$P_{v''} = 42.41 \text{ mbar (annexe 3)}$$

$$P_t = 1 \text{ bar}$$

$$\Psi_{\text{Air}0}''' = [42,41/10^3 - 42,41]18/29 = 0.02748 \text{ Kg d'H}_2\text{O/Kg d'air sec}$$

$$\Psi_{\text{Air}0}''' = 0.02748 \text{ Kg d'H}_2\text{O/Kg d'air sec}$$

Température de sortie de l'air :

$$\Delta t_{\text{Air}} = [(k_x/60) + 0.1] [((T_e + T_s)/2) - t_1]$$

T_e : Température d'entrée du l'air chaud.

T_s : Température de sortie du fluide chaud

t_1 : Température d'entrée du l'eau froid.

k_x : coefficient global d'échange de chaleur à partir des caractéristique du fluide chaud (nature et résistance d'encrassement) (Annexe 10)

$T_s = \Delta t_{\text{Air}} + t_1$ Température de sortie du fluide froid.

$$\Delta t_{\text{Air}} = [(28/60) + 0.1] [((70+25)/2) - 20]$$

$$\Delta t_{\text{Air}} = 15.58$$

$$\text{On a : } T_s = \Delta t_{\text{Air}} + t_1 \quad \longrightarrow \quad T_s = 15.58 + 30$$

$$T_s = 45.58$$

Sortie de l'air à 48°C :

$$\Psi_{\text{Air}}''' = \left[\frac{Pv''}{Pt - Pv''} \right] \frac{MH_2O}{M_{\text{air}}}$$

$$\Psi_{\text{Air}}''' = [148,80/10^3 - 148,80] 18/29 = 0.02748 \text{ Kg d'H}_2\text{O/Kg d'air sec}$$

$$\Psi_{\text{Air}}''' = 0.1085 \text{ Kg d'H}_2\text{O/Kg d'air sec}$$

III.5.3 Calcul des enthalpies :**A-calcul des enthalpies de l'air****Entrée de l'air à : $T_{\text{Air}0} = 30^\circ\text{C}$, $T_0 = 0^\circ\text{C}$**

$$H_{\text{Air}0} = C_{p_{\text{air}}}(T_{\text{Air}0} - T_0) + \Psi_{\text{Air}0}''' [C_{p_{\text{vap}}}(T_{\text{Air}0} - T_0) + L_V T_0]$$

Où la chaleur spécifique varie en fonction de la température :

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 ; (\text{annexe 1})$$

$$C_{p_{\text{air}}} = 1.01896 \text{ kJ/kg.K d'air sec}$$

$$C_{p_{\text{vap}}} = 1.1802 \text{ kJ/kg.K d'H}_2\text{O}$$

$$\Psi_{\text{Air}0}''' = 0.02748 \text{ kg d'H}_2\text{O/Kg d'air sec}$$

$$L_{V_{T_0}} = 2500.29 \text{ KJ/Kg d'H}_2\text{O}$$

$$H_{\text{Air}0} = 1.01896 (30-0) + 0.02748 [1.1802 (30-0) + 2500.29]$$

$$H_{\text{Air}0} = 93.445 \text{ KJ/kg d'air sec}$$

Sortie de l'air à $T_{a2}=45.6^{\circ}\text{C}$:

$$H_{\text{Air}} = C_{p\text{air}}(T_{\text{Air}}-T_0) + \Psi_{\text{Air}0}''' [C_{p\text{vap}}(T_{\text{Air}}-T_0) + LV_{T0}]$$

$$C_{p\text{air}} = 1.021734 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K d'air sec}$$

$$C_{p\text{vap}} = 1.184936 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K d'H}_2\text{O}$$

$$\Psi_{\text{Air}}''' = 0.1085 \text{ kg d'H}_2\text{O/kg d'air sec}$$

$$H_{\text{Air}} = 326.5188 \text{ kJ/kg d'air sec}$$

B-Calcul des enthalpies de l'eau

Entrée de l'eau 1 à $T_e=70^{\circ}\text{C}$:

$$H_e = C_{p\text{liq}}(T_e - T_0)$$

$$C_{p\text{liq}} = 4.19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K d'eau} \Rightarrow H_e = (4.19)70 = 293.3 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Sortie de l'eau à $T_s=25^{\circ}\text{C}$:

$$H_s = C_{p\text{liq}}(T_s - T_0)$$

$$C_{p\text{liq}} = 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K d'eau} \Rightarrow H_s = 104.5 \text{ kJ/Kg} \cdot \text{K d'eau}$$

Tableau III.2 : récapitulatif des principaux résultats du calcul des débits de
Refroidissement

| Fluide | Grandeur | valeur | Unité |
|--|-----------------|-----------------|--------------------------|
| Air Colonne de lavage | T_{a1} | 93 | °C |
| | Ψ''_{a1} | 0.0783 | Kg d'H2O/Kg d'air sec |
| | H'_{a1} | 303.74 | kJ/kg d'eau |
| | T_{a2} | 13 | °C |
| | Ψ''_{a2} | $1,411.10^{-3}$ | Kg d'H2O/Kg d'air sec |
| | H'_{a2} | 16.57 | kJ/kg d'air sec |
| Eau Colonne de lavage | T_1 | 11 | °C |
| | H_1 | 46.2 | kJ/kg d'eau |
| | T_2 | 25 | °C |
| | H_2 | 104.5 | kJ/kg d'eau |
| | T_3 | 80 | °C |
| | H_3 | 335.40 | kJ/kg d'eau |
| Azote impur Colonne de refroidissement | T_{G0} | 16 | °C |
| | H_{G0} | 16.65 | kJ/kg d'azote sec |
| | T_{G1} | 30 | °C |
| | H_{G1} | 66.37 | kJ/kg d'azote sec |
| Eau Colonne de refroidissement | T_0 | 25 | °C |
| | H_0 | 104.5 | kJ/kg d'eau |
| | T_1 | 11 | °C |
| | H_1 | 46.31 | kJ/kg d'eau |
| Air Aéro-Réfrigérant | T_{Air0} | 30 | °C |
| | Ψ''_{Air0} | 0.02748 | Kg d'H2O/Kg d'air sec |
| | H_{Air0} | 93.445 | kJ/kg d'eau |
| | T_{Air} | 45.6 | °C |
| | Ψ'''_{Air} | 0.1085 | Kg d'H2O/Kg d'air sec |
| | H_{Air} | 326.51888 | kJ/kg d'air sec |
| | $C_{p_{air}}$ | 1.021734 | kJ/kg .K d'air sec |
| | $C_{p_{vap}}$ | 1.184936 | kJ/kg.K d'H2O |
| Eau | T_e | 70 | °C |
| | H_e | 293.3 | kJ/kg d'eau |
| | T_s | 25 | °C |
| | H_s | 104.5 | kJ/kg d'eau |
| | $C_{p_{liq}}$ | 4.18 | kJ/kg.K d'eau |

Conclusion générale

Conclusion générale

La réalisation de ce projet de fin d'études nous a permis de maîtriser le fonctionnement des différents équipements de la centrale à oxygène en général destinés à la production des gaz de l'air. Notre attention s'est focalisée sur l'unité COX 3, particulièrement le système de refroidissement.

Il ressort essentiellement de cette étude que :

- Le rendement thermique de l'installation est de 25%, soit 5% de moins par rapport aux centrales modernes.
- La COX3 dotées d'un système d'épuration en tête, constitué d'adsorbants à tamis moléculaire, au niveau desquels les impuretés sont éliminées par sélectivité en tête d'installation. Le CO₂ et l'H₂O sont éliminés en phase gazeuse alors que les hydrocarbures sont éliminés en phase liquide.
- Les résultats de l'étude du système de refroidissement au niveau des colonnes de lavage de l'air par l'eau et de refroidissement de l'eau par l'azote montrent que :
 - ✓ L'air est refroidi par l'eau au niveau de la colonne de lavage jusqu'à une température de 10 à 14 au niveau de la COX3 (processus LINDE), alors qu'au niveau de la COX4 (AIR Liquide), l'air est refroidi entre 22 à 30°C.
 - ✓ L'air atmosphérique à l'entrée de l'installation contient d'importantes quantités d'eau et de CO₂.

D'une manière générale, les calculs effectués sur les différents équipements des unités montrent que le fonctionnement ceux-ci ne pas préconisés par le concepteur de l'installation.

Les calculs montrent que les équipements de refroidissement à contact direct fonctionnent correctement, et les fluctuations sur la température de l'air est essentiellement due au réchauffement global constaté, Ce qui ne permet pas d'atteindre en été surtout les paramètres recommandés. On peut préconiser l'ajout d'un autre système de refroidissement à contact indirect tel qu'un échangeur -faisceau-calandre mais les débits d'air et les perturbations saisonnières de la température importante, sa rentabilité financière est plus que douteuse, aussi un calcul technico-économique précis est plus que nécessaire

Références bibliographique

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] mémoire de fin d'étude, génie chimie. université Badji Mokhtar Annaba (ETUDE D'UNE UNITE DE SEPARATION DE L'AIR : Vérification des system d'épuration et amélioration du pourcentage de production d'oxygène au niveau de la double colonne). Présenté par Bougandoura et Ghegaglia, Edition 2007.
- [2] : mémoire de fin d'étude, génie mécanique, université Badji Mokhtar Annaba, (Etude des systèmes de refroidissement et d'épuration de l'air des unités N°3 ET N°4 de centrale à oxygène du complexe sidérurgique d'El-Hadjar). présenté par Houwam, Edition 2015
- [3] mémoire de fin d'étude, spécialité génie mécanique, université Badji Mokhtar Annaba, (Etude des systèmes d'épuration de l'air au niveau de cryosid), Edition 2001.
- [4] : mémoire de fin d'étude, génie mécanique, université Badji Mokhtar Annaba (Contribution à l'amélioration de la production de l'argon au niveau de cryosid) Edition 2000.
- [5] : Air séparation techniques course by Anders Lenneskog, Cryogenic plants. Version 8 June 2007.
- [6] Linde Engineering: Air separation History and technological progress. Cryogenic air separation.
- [7] : www.messergroup.com / www.specialtygases.de Gases for Life Messer France S.A.S, consulté le 06/03/2017
- [8] Djelloul Amel, Simulation de cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air, l'azote et de l'oxygène, mémoire de Magister en génie climatique ; Université Mentouri Constantine, 2001
- [9] Séparation des gaz de l'air, direction de formation, 2005.
- [10] Manuel opératoire, procédé et fonctionnement, (volume 1 LINDE AG constructeur).
- [11] L. Duvivier, « Étude des divers procédés de lutte contre l'entartrage des circuits de réfrigération des centrales électriques », Travail de Fin d'études, Université Catholique de Louvain, Facultes des Sciences Appliquées, juin 1988.
- [12] G. Gutner, « Aéroréfrigérants secs et mixtes », École d'Été de mécanique des fluides, 60-69, 610 October 1975.

Consultation des mémoires des promotions antérieures

- Bilan énergétique de l'unité de fractionnement de l'air ; Saighi Mohamed reda, souames Zoheir, A.Haouam, génie mécanique, université Badji Mokhtar Annaba, juin 1999.
- Etude d'une unité de séparation de l'air ; Sebti Wassila, Khelous Amel, A.Derradji génie des procédés, université Badji Mokhtar Annaba . juin 2009



ANNEXES

Annexe 1 : Expression de la chaleur massique en fonction de la température

TABLE A.2

Chaleurs massiques de gaz parfaits. (suite)

c) En fonction de la température.

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

(T en K, c_p en kJ/kmol · K)

| Substance | Formule | a | b | c | d | Plage de température, K | % erreur | |
|---------------------|---------------------------------|--------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|----------|------|
| | | | | | | | Max | Moy |
| Azote | N ₂ | 28,90 | -0,1571 × 10 ⁻² | 0,8081 × 10 ⁻⁵ | -2,873 × 10 ⁻⁹ | 273-1 800 | 0,59 | 0,34 |
| Oxygène | O ₂ | 25,48 | 1,520 × 10 ⁻² | -0,7155 × 10 ⁻⁵ | 1,312 × 10 ⁻⁹ | 273-1 800 | 1,19 | 0,28 |
| Air | — | 28,11 | 0,1967 × 10 ⁻² | 0,4802 × 10 ⁻⁵ | -1,966 × 10 ⁻⁹ | 273-1 800 | 0,72 | 0,33 |
| Hydrogène | H ₂ | 29,11 | -0,1916 × 10 ⁻² | 0,4003 × 10 ⁻⁵ | -0,8704 × 10 ⁻⁹ | 273-1 800 | 1,01 | 0,26 |
| Monoxyde de carbone | CO | 28,16 | 0,1675 × 10 ⁻² | 0,5372 × 10 ⁻⁵ | -2,222 × 10 ⁻⁹ | 273-1 800 | 0,89 | 0,37 |
| Dioxyde de carbone | CO ₂ | 22,26 | 5,981 × 10 ⁻² | -3,501 × 10 ⁻⁵ | 7,469 × 10 ⁻⁹ | 273-1 800 | 0,67 | 0,22 |
| Vapeur d'eau | H ₂ O | 32,24 | 0,1923 × 10 ⁻² | 1,055 × 10 ⁻⁵ | -3,595 × 10 ⁻⁹ | 273-1 800 | 0,53 | 0,24 |
| Oxyde nitrique | NO | 29,34 | -0,09395 × 10 ⁻² | 0,9747 × 10 ⁻⁵ | -4,187 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,97 | 0,36 |
| Oxyde nitreux | N ₂ O | 24,11 | 5,8632 × 10 ⁻² | -3,562 × 10 ⁻⁵ | 10,58 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,59 | 0,26 |
| Dioxyde d'azote | NO ₂ | 22,9 | 5,715 × 10 ⁻² | -3,52 × 10 ⁻⁵ | 7,87 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,46 | 0,18 |
| Ammoniac | NH ₃ | 27,568 | 2,5630 × 10 ⁻² | 0,99072 × 10 ⁻⁵ | -6,6909 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,91 | 0,36 |
| Soufre | S ₂ | 27,21 | 2,218 × 10 ⁻² | -1,628 × 10 ⁻⁵ | 3,986 × 10 ⁻⁹ | 273-1 800 | 0,99 | 0,38 |
| Dioxyde de soufre | SO ₂ | 25,78 | 5,795 × 10 ⁻² | -3,812 × 10 ⁻⁵ | 8,612 × 10 ⁻⁹ | 273-1 800 | 0,45 | 0,24 |
| Trioxyde de soufre | SO ₃ | 16,40 | 14,58 × 10 ⁻² | -11,20 × 10 ⁻⁵ | 32,42 × 10 ⁻⁹ | 273-1 300 | 0,29 | 0,13 |
| Acétylène | C ₂ H ₂ | 21,8 | 9,2143 × 10 ⁻² | -6,527 × 10 ⁻⁵ | 18,21 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 1,46 | 0,59 |
| Benzène | C ₆ H ₆ | -36,22 | 48,475 × 10 ⁻² | -31,57 × 10 ⁻⁵ | 77,62 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,34 | 0,20 |
| Méthanol | CH ₃ O | 19,0 | 9,152 × 10 ⁻² | -1,22 × 10 ⁻⁵ | -8,039 × 10 ⁻⁹ | 273-1 000 | 0,18 | 0,08 |
| Éthanol | C ₂ H ₅ O | 19,9 | 20,96 × 10 ⁻² | -10,38 × 10 ⁻⁵ | 20,05 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,40 | 0,22 |
| Acide chlorhydrique | HCl | 30,33 | -0,7620 × 10 ⁻² | 1,327 × 10 ⁻⁵ | -4,338 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,22 | 0,08 |
| Méthane | CH ₄ | 19,89 | 5,024 × 10 ⁻² | 1,269 × 10 ⁻⁵ | -11,01 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 1,33 | 0,57 |
| Éthane | C ₂ H ₆ | 6,900 | 17,27 × 10 ⁻² | -6,406 × 10 ⁻⁵ | 7,285 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,83 | 0,28 |
| Propane | C ₃ H ₈ | -4,04 | 30,48 × 10 ⁻² | -15,72 × 10 ⁻⁵ | 31,74 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,40 | 0,12 |
| n-Butane | C ₄ H ₁₀ | 3,96 | 37,15 × 10 ⁻² | -18,34 × 10 ⁻⁵ | 35,00 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,54 | 0,24 |
| i-Butane | C ₄ H ₁₀ | -7,913 | 41,60 × 10 ⁻² | -23,01 × 10 ⁻⁵ | 49,91 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,25 | 0,13 |
| n-Pentane | C ₅ H ₁₂ | 6,774 | 45,43 × 10 ⁻² | -22,46 × 10 ⁻⁵ | 42,29 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,56 | 0,21 |
| n-Hexane | C ₆ H ₁₄ | 6,938 | 55,22 × 10 ⁻² | -28,65 × 10 ⁻⁵ | 57,69 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,72 | 0,20 |
| Éthylène | C ₂ H ₄ | 3,95 | 15,64 × 10 ⁻² | -8,344 × 10 ⁻⁵ | 17,67 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,54 | 0,13 |
| Propylène | C ₃ H ₆ | 3,15 | 23,83 × 10 ⁻² | -12,18 × 10 ⁻⁵ | 24,62 × 10 ⁻⁹ | 273-1 500 | 0,73 | 0,17 |

Annexe 2 : Propriétés des substances liquides

TABLE A.3

Propriétés de substances liquides et solides et d'aliments.

a) Liquides.

| Substance | Ébullition à 1 atm | | Solidification | | Propriétés des liquides | | |
|--------------------------------------|-----------------------|--|----------------------------|--|-------------------------|--|------------------------------------|
| | Point d'ébullition °C | Chaleur latente d'évaporation h_{fg} , kJ/kg | Point de solidification °C | Chaleur latente de fusion h_{if} , kJ/kg | Température °C | Masse volumique ρ , kg/m ³ | Chaleur massique c_p , kJ/kg · K |
| Alcool éthylique | 78,6 | 855 | -156 | 108 | 20 | 789 | 2,84 |
| Ammoniac | -33,3 | 1 357 | -77,7 | 322,4 | -33,3 | 682 | 4,43 |
| | | | | | -20 | 665 | 4,52 |
| | | | | | 0 | 639 | 4,60 |
| | | | | | 25 | 602 | 4,80 |
| Argon | -185,9 | 161,6 | -189,3 | 28 | -185,6 | 1 394 | 1,14 |
| Azote | -195,8 | 198,6 | -210 | 25,3 | -195,8 | 809 | 2,06 |
| | | | | | -160 | 596 | 2,97 |
| Benzène | 80,2 | 394 | 5,5 | 126 | 20 | 879 | 1,72 |
| n-Butane | -0,5 | 385,2 | -138,5 | 80,3 | -0,5 | 601 | 2,31 |
| Dioxyde de carbone | -78,4* | 230,5 (à 0 °C) | -56,6 | | 0 | 298 | 0,59 |
| Eau | 100 | 2 257 | 0,0 | 333,7 | 0 | 1 000 | 4,22 |
| | | | | | 25 | 997 | 4,18 |
| | | | | | 50 | 988 | 4,18 |
| | | | | | 75 | 975 | 4,19 |
| | | | | | 100 | 958 | 4,22 |
| Éthanol | 78,2 | 838,3 | -114,2 | 109 | 25 | 783 | 2,46 |
| Éthylène glycol | 198,1 | 800,1 | -10,8 | 181,1 | 20 | 1 109 | 2,84 |
| Glycérine | 179,9 | 974 | 18,9 | 200,6 | 20 | 1 261 | 2,32 |
| Hélium | -268,9 | 22,8 | — | — | -268,9 | 146,2 | 22,8 |
| Huile | | | | | 25 | 910 | 1,80 |
| Hydrogène | -252,8 | 445,7 | -259,2 | 59,5 | -252,8 | 70,7 | 10,0 |
| Isobutane | -11,7 | 367,1 | -160 | 105,7 | -11,7 | 593,8 | 2,28 |
| Kérosène | 204-293 | 251 | -24,9 | — | 20 | 820 | 2,00 |
| Mercure | 356,7 | 294,7 | -38,9 | 11,4 | 25 | 13 560 | 0,139 |
| Méthane | -161,5 | 510,4 | -182,2 | 58,4 | -161,5 | 423 | 3,49 |
| | | | | | -100 | 301 | 5,79 |
| Méthanol | 64,5 | 1 100 | -97,7 | 99,2 | 25 | 787 | 2,55 |
| Octane | 124,8 | 306,3 | -57,5 | 180,7 | 20 | 703 | 2,10 |
| Oxygène | -183 | 212,7 | -218,8 | 13,7 | -183 | 1 141 | 1,71 |
| Pétrole | — | 230-384 | | | 20 | 640 | 2,0 |
| Propane | -42,1 | 427,8 | -187,7 | 80,0 | -42,1 | 581 | 2,25 |
| | | | | | 0 | 529 | 2,53 |
| | | | | | 50 | 449 | 3,13 |
| Réfrigérant R-134a | -26,1 | 217,0 | -96,6 | — | -50 | 1 443 | 1,23 |
| | | | | | -26,1 | 1 374 | 1,27 |
| | | | | | 0 | 1 295 | 1,34 |
| | | | | | 25 | 1 207 | 1,43 |
| Saumure (20 % de chlorure de sodium) | 103,9 | — | -17,4 | — | 20 | 1 150 | 3,11 |

* Température de sublimation. En dessous de la pression de son point triple (518 kPa), le dioxyde de carbone se présente sous forme solide ou gazeuse. Le point de solidification du dioxyde de carbone est égal à la température de son point triple, soit -56,5 °C.

Annexe 3: pression partielle de vapeur d'eau saturante et chaleur latente de vaporisation en fonction de la température

| T(°C) | P''_v (mbar) | L_v (kcal/Kg) | T(°C) | P''_v (mbar) | L_v (kcal/Kg) |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 0 | 6.10 | 597.3 | 33 | 50.28 | 578.7 |
| 1 | 6.56 | 596.7 | 34 | 53.17 | 578.2 |
| 10 | 12.27 | 591.7 | 35 | 56.20 | 577.6 |
| 11 | 13.12 | 591.2 | 36 | 59.39 | 577.9 |
| 12 | 14.02 | 590.6 | 37 | 62.73 | 576.5 |
| 15 | 17.04 | 588.9 | 38 | 66.23 | 575.9 |
| 16 | 18.17 | 588.3 | 39 | 69.89 | 575.3 |
| 17 | 19.36 | 587.7 | 40 | 73.74 | 574.7 |
| 29 | 40.03 | 581.0 | 41 | 77.76 | 574.1 |
| 3 | 42.41 | 580.4 | 80 | 473.6 | 551.3 |
| 31 | 44.90 | 579.9 | 100 | 1013.2 | 539.0 |

Annexe 4 : Variables thermodynamique de l'air à basse pression

TABLE A.17

Variables thermodynamiques de l'air à basse pression.

| T K | h kJ/kg | P_r | u kJ/kg | v_r | s° kJ/kg · K | T K | h kJ/kg | P_r | u kJ/kg | v_r | s° kJ/kg · K |
|----------|--------------|--------|--------------|---------|--------------------------|----------|--------------|-------|--------------|--------|--------------------------|
| 200 | 199,97 | 0,3363 | 142,56 | 1 707,0 | 1,29559 | 580 | 586,04 | 14,38 | 419,55 | 115,7 | 2,37348 |
| 210 | 209,97 | 0,3987 | 149,69 | 1 512,0 | 1,34444 | 590 | 596,52 | 15,31 | 427,15 | 110,6 | 2,39140 |
| 220 | 219,97 | 0,4690 | 156,82 | 1 346,0 | 1,39105 | 600 | 607,02 | 16,28 | 434,78 | 105,8 | 2,40902 |
| 230 | 230,02 | 0,5477 | 164,00 | 1 205,0 | 1,43557 | 610 | 617,53 | 17,30 | 442,42 | 101,2 | 2,42644 |
| 240 | 240,02 | 0,6355 | 171,13 | 1 084,0 | 1,47824 | 620 | 628,07 | 18,36 | 450,09 | 96,92 | 2,44356 |
| 250 | 250,05 | 0,7329 | 178,28 | 979,0 | 1,51917 | 630 | 638,63 | 19,84 | 457,78 | 92,84 | 2,46048 |
| 260 | 260,09 | 0,8405 | 185,45 | 887,8 | 1,55848 | 640 | 649,22 | 20,64 | 465,50 | 88,99 | 2,47716 |
| 270 | 270,11 | 0,9590 | 192,60 | 808,0 | 1,59634 | 650 | 659,84 | 21,86 | 473,25 | 85,34 | 2,49364 |
| 280 | 280,13 | 1,0889 | 199,75 | 738,0 | 1,63279 | 660 | 670,47 | 23,13 | 481,01 | 81,89 | 2,50985 |
| 285 | 285,14 | 1,1584 | 203,33 | 706,1 | 1,65055 | 670 | 681,14 | 24,46 | 488,81 | 78,61 | 2,52589 |
| 290 | 290,16 | 1,2311 | 206,91 | 676,1 | 1,66802 | 680 | 691,82 | 25,85 | 496,62 | 75,50 | 2,54175 |
| 295 | 295,17 | 1,3068 | 210,49 | 647,9 | 1,68515 | 690 | 702,52 | 27,29 | 504,45 | 72,56 | 2,55731 |
| 298 | 298,18 | 1,3543 | 212,64 | 631,9 | 1,69528 | 700 | 713,27 | 28,80 | 512,33 | 69,76 | 2,57277 |
| 300 | 300,19 | 1,3860 | 214,07 | 621,2 | 1,70203 | 710 | 724,04 | 30,38 | 520,23 | 67,07 | 2,58810 |
| 305 | 305,22 | 1,4686 | 217,67 | 596,0 | 1,71865 | 720 | 734,82 | 32,02 | 528,14 | 64,53 | 2,60319 |
| 310 | 310,24 | 1,5546 | 221,25 | 572,3 | 1,73498 | 730 | 745,62 | 33,72 | 536,07 | 62,13 | 2,61803 |
| 315 | 315,27 | 1,6442 | 224,85 | 549,8 | 1,75106 | 740 | 756,44 | 35,50 | 544,02 | 59,82 | 2,63280 |
| 320 | 320,29 | 1,7375 | 228,42 | 528,6 | 1,76690 | 750 | 767,29 | 37,35 | 551,99 | 57,63 | 2,64737 |
| 325 | 325,31 | 1,8345 | 232,02 | 508,4 | 1,78249 | 760 | 778,18 | 39,27 | 560,01 | 55,54 | 2,66176 |
| 330 | 330,34 | 1,9352 | 235,61 | 489,4 | 1,79783 | 780 | 800,03 | 43,35 | 576,12 | 51,64 | 2,69013 |
| 340 | 340,42 | 2,149 | 242,82 | 454,1 | 1,82790 | 800 | 821,95 | 47,75 | 592,30 | 48,08 | 2,71787 |
| 350 | 350,49 | 2,379 | 250,02 | 422,2 | 1,85708 | 820 | 843,98 | 52,59 | 608,59 | 44,84 | 2,74504 |
| 360 | 360,58 | 2,626 | 257,24 | 393,4 | 1,88543 | 840 | 866,08 | 57,60 | 624,95 | 41,85 | 2,77170 |
| 370 | 370,67 | 2,892 | 264,46 | 367,2 | 1,91313 | 860 | 888,27 | 63,09 | 641,40 | 39,12 | 2,79783 |
| 380 | 380,77 | 3,176 | 271,69 | 343,4 | 1,94001 | 880 | 910,56 | 68,98 | 657,95 | 36,61 | 2,82344 |
| 390 | 390,88 | 3,481 | 278,93 | 321,5 | 1,96633 | 900 | 932,93 | 75,29 | 674,58 | 34,31 | 2,84856 |
| 400 | 400,98 | 3,806 | 286,16 | 301,6 | 1,99194 | 920 | 955,38 | 82,05 | 691,28 | 32,18 | 2,87324 |
| 410 | 411,12 | 4,153 | 293,43 | 283,3 | 2,01699 | 940 | 977,92 | 89,28 | 708,08 | 30,22 | 2,89748 |
| 420 | 421,26 | 4,522 | 300,69 | 266,6 | 2,04142 | 960 | 1 000,55 | 97,00 | 725,02 | 28,40 | 2,92128 |
| 430 | 431,43 | 4,915 | 307,99 | 251,1 | 2,06533 | 980 | 1 023,25 | 105,2 | 741,98 | 26,73 | 2,94468 |
| 440 | 441,61 | 5,332 | 315,30 | 236,8 | 2,08870 | 1 000 | 1 046,04 | 114,0 | 758,94 | 25,17 | 2,96770 |
| 450 | 451,80 | 5,775 | 322,62 | 223,6 | 2,11161 | 1 020 | 1 068,89 | 123,4 | 776,10 | 23,72 | 2,99034 |
| 460 | 462,02 | 6,245 | 329,97 | 211,4 | 2,13407 | 1 040 | 1 091,85 | 133,3 | 793,36 | 23,29 | 3,01260 |
| 470 | 472,24 | 6,742 | 337,32 | 200,1 | 2,15604 | 1 060 | 1 114,86 | 143,9 | 810,62 | 21,14 | 3,03449 |
| 480 | 482,49 | 7,268 | 344,70 | 189,5 | 2,17760 | 1 080 | 1 137,89 | 155,2 | 827,88 | 19,98 | 3,05608 |
| 490 | 492,74 | 7,824 | 352,08 | 179,7 | 2,19876 | 1 100 | 1 161,07 | 167,1 | 845,33 | 18,896 | 3,07732 |
| 500 | 503,02 | 8,411 | 359,49 | 170,6 | 2,21952 | 1 120 | 1 184,28 | 179,7 | 862,79 | 17,886 | 3,09825 |
| 510 | 513,32 | 9,031 | 366,92 | 162,1 | 2,23993 | 1 140 | 1 207,57 | 193,1 | 880,35 | 16,946 | 3,11883 |
| 520 | 523,63 | 9,684 | 374,36 | 154,1 | 2,25997 | 1 160 | 1 230,92 | 207,2 | 897,91 | 16,064 | 3,13916 |
| 530 | 533,98 | 10,37 | 381,84 | 146,7 | 2,27967 | 1 180 | 1 254,34 | 222,2 | 915,57 | 15,241 | 3,15916 |
| 540 | 544,35 | 11,10 | 389,34 | 139,7 | 2,29906 | 1 200 | 1 277,79 | 238,0 | 933,33 | 14,470 | 3,17888 |
| 550 | 555,74 | 11,86 | 396,86 | 133,1 | 2,31809 | 1 220 | 1 301,31 | 254,7 | 951,09 | 13,747 | 3,19834 |
| 560 | 565,17 | 12,66 | 404,42 | 127,0 | 2,33685 | 1 240 | 1 324,93 | 272,3 | 968,95 | 13,069 | 3,21751 |
| 570 | 575,59 | 13,50 | 411,97 | 121,2 | 2,35531 | | | | | | |

Annexe 5 : Enthalpie, énergie interne et entropie absolue de l'azote à 1 atm.

TABLE A.18

Enthalpie, énergie interne et entropie absolue de l'azote N₂ à 1 atm.

| T K | \bar{h} kJ/kmol | \bar{u} kJ/kmol | \bar{s}° kJ/kmol·K | T K | \bar{h} kJ/kmol | \bar{u} kJ/kmol | \bar{s}° kJ/kmol·K |
|--------|----------------------|----------------------|------------------------------|--------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 17 563 | 12 574 | 212,066 |
| 220 | 6 391 | 4 562 | 182,639 | 610 | 17 864 | 12 792 | 212,564 |
| 230 | 6 683 | 4 770 | 183,938 | 620 | 18 166 | 13 011 | 213,055 |
| 240 | 6 975 | 4 979 | 185,180 | 630 | 18 468 | 13 230 | 213,541 |
| 250 | 7 266 | 5 188 | 186,370 | 640 | 18 772 | 13 450 | 214,018 |
| 260 | 7 558 | 5 396 | 187,514 | 650 | 19 075 | 13 671 | 214,489 |
| 270 | 7 849 | 5 604 | 188,614 | 660 | 19 380 | 13 892 | 214,954 |
| 280 | 8 141 | 5 813 | 189,673 | 670 | 19 685 | 14 114 | 215,413 |
| 290 | 8 432 | 6 021 | 190,695 | 680 | 19 991 | 14 337 | 215,866 |
| 298 | 8 669 | 6 190 | 191,502 | 690 | 20 297 | 14 560 | 216,314 |
| 300 | 8 723 | 6 229 | 191,682 | 700 | 20 604 | 14 784 | 216,756 |
| 310 | 9 014 | 6 437 | 192,638 | 710 | 20 912 | 15 008 | 217,192 |
| 320 | 9 306 | 6 645 | 193,562 | 720 | 21 220 | 15 234 | 217,624 |
| 330 | 9 597 | 6 853 | 194,459 | 730 | 21 529 | 15 460 | 218,059 |
| 340 | 9 888 | 7 061 | 195,328 | 740 | 21 839 | 15 686 | 218,472 |
| 350 | 10 180 | 7 270 | 196,173 | 750 | 22 149 | 15 913 | 218,889 |
| 360 | 10 471 | 7 478 | 196,995 | 760 | 22 460 | 16 141 | 219,301 |
| 370 | 10 763 | 7 687 | 197,794 | 770 | 22 772 | 16 370 | 219,709 |
| 380 | 11 055 | 7 895 | 198,572 | 780 | 23 085 | 16 599 | 220,113 |
| 390 | 11 347 | 8 104 | 199,331 | 790 | 23 398 | 16 830 | 220,512 |
| 400 | 11 640 | 8 314 | 200,071 | 800 | 23 714 | 17 061 | 220,907 |
| 410 | 11 932 | 8 523 | 200,794 | 810 | 24 027 | 17 292 | 221,298 |
| 420 | 12 225 | 8 733 | 201,499 | 820 | 24 342 | 17 524 | 221,684 |
| 430 | 12 518 | 8 943 | 202,189 | 830 | 24 658 | 17 757 | 222,067 |
| 440 | 12 811 | 9 153 | 202,863 | 840 | 24 974 | 17 990 | 222,447 |
| 450 | 13 105 | 9 363 | 203,523 | 850 | 25 292 | 18 224 | 222,822 |
| 460 | 13 399 | 9 574 | 204,170 | 860 | 25 610 | 18 459 | 223,194 |
| 470 | 13 693 | 9 786 | 204,803 | 870 | 25 928 | 18 695 | 223,562 |
| 480 | 13 988 | 9 997 | 205,424 | 880 | 26 248 | 18 931 | 223,927 |
| 490 | 14 285 | 10 210 | 206,033 | 890 | 26 568 | 19 168 | 224,288 |
| 500 | 14 581 | 10 423 | 206,630 | 900 | 26 890 | 19 407 | 224,647 |
| 510 | 14 876 | 10 635 | 207,216 | 910 | 27 210 | 19 644 | 225,002 |
| 520 | 15 172 | 10 848 | 207,792 | 920 | 27 532 | 19 883 | 225,353 |
| 530 | 15 469 | 11 062 | 208,358 | 930 | 27 854 | 20 122 | 225,701 |
| 540 | 15 766 | 11 277 | 208,914 | 940 | 28 178 | 20 362 | 226,047 |
| 550 | 16 064 | 11 492 | 209,461 | 950 | 28 501 | 20 603 | 226,389 |
| 560 | 16 363 | 11 707 | 209,999 | 960 | 28 826 | 20 844 | 226,728 |
| 570 | 16 662 | 11 923 | 210,528 | 970 | 29 151 | 21 086 | 227,064 |
| 580 | 16 962 | 12 139 | 211,049 | 980 | 29 476 | 21 328 | 227,398 |
| 590 | 17 262 | 12 356 | 211,562 | 990 | 29 803 | 21 571 | 227,728 |

Annexe 6 : Enthalpie, énergie interne et entropie absolue de l'oxygène à 1 atm.

TABLE A.19

Enthalpie, énergie interne et entropie absolue de l'oxygène O₂ à 1 atm.

| T K | \bar{h} kJ/kmol | \bar{u} kJ/kmol | \bar{s}° kJ/kmol · K | T K | \bar{h} kJ/kmol | \bar{u} kJ/kmol | \bar{s}° kJ/kmol · K |
|----------|----------------------|----------------------|--------------------------------|----------|----------------------|----------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 17 929 | 12 940 | 226,346 |
| 220 | 6 404 | 4 575 | 196,171 | 610 | 18 250 | 13 178 | 226,877 |
| 230 | 6 694 | 4 782 | 197,461 | 620 | 18 572 | 13 417 | 227,400 |
| 240 | 6 984 | 4 989 | 198,696 | 630 | 18 895 | 13 657 | 227,918 |
| 250 | 7 275 | 5 197 | 199,885 | 640 | 19 219 | 13 898 | 228,429 |
| 260 | 7 566 | 5 405 | 201,027 | 650 | 19 544 | 14 140 | 228,932 |
| 270 | 7 858 | 5 613 | 202,128 | 660 | 19 870 | 14 383 | 229,430 |
| 280 | 8 150 | 5 822 | 203,191 | 670 | 20 197 | 14 626 | 229,920 |
| 290 | 8 443 | 6 032 | 204,218 | 680 | 20 524 | 14 871 | 230,405 |
| 298 | 8 682 | 6 203 | 205,033 | 690 | 20 854 | 15 116 | 230,885 |
| 300 | 8 736 | 6 242 | 205,213 | 700 | 21 184 | 15 364 | 231,358 |
| 310 | 9 030 | 6 453 | 206,177 | 710 | 21 514 | 15 611 | 231,827 |
| 320 | 9 325 | 6 664 | 207,112 | 720 | 21 845 | 15 859 | 232,291 |
| 330 | 9 620 | 6 877 | 208,020 | 730 | 22 177 | 16 107 | 232,748 |
| 340 | 9 916 | 7 090 | 208,904 | 740 | 22 510 | 16 357 | 233,201 |
| 350 | 10 213 | 7 303 | 209,765 | 750 | 22 844 | 16 607 | 233,649 |
| 360 | 10 511 | 7 518 | 210,604 | 760 | 23 178 | 16 859 | 234,091 |
| 370 | 10 809 | 7 733 | 211,423 | 770 | 23 513 | 17 111 | 234,528 |
| 380 | 11 109 | 7 949 | 212,222 | 780 | 23 850 | 17 364 | 234,960 |
| 390 | 11 409 | 8 166 | 213,002 | 790 | 24 186 | 17 618 | 235,387 |
| 400 | 11 711 | 8 384 | 213,765 | 800 | 24 523 | 17 872 | 235,810 |
| 410 | 12 012 | 8 603 | 214,510 | 810 | 24 861 | 18 126 | 236,230 |
| 420 | 12 314 | 8 822 | 215,241 | 820 | 25 199 | 18 382 | 236,644 |
| 430 | 12 618 | 9 043 | 215,955 | 830 | 25 537 | 18 637 | 237,055 |
| 440 | 12 923 | 9 264 | 216,656 | 840 | 25 877 | 18 893 | 237,462 |
| 450 | 13 228 | 9 487 | 217,342 | 850 | 26 218 | 19 150 | 237,864 |
| 460 | 13 525 | 9 710 | 218,016 | 860 | 26 559 | 19 408 | 238,264 |
| 470 | 13 842 | 9 935 | 218,676 | 870 | 26 899 | 19 666 | 238,660 |
| 480 | 14 151 | 10 160 | 219,326 | 880 | 27 242 | 19 925 | 239,051 |
| 490 | 14 460 | 10 386 | 219,963 | 890 | 27 584 | 20 185 | 239,439 |
| 500 | 14 770 | 10 614 | 220,589 | 900 | 27 928 | 20 445 | 239,823 |
| 510 | 15 082 | 10 842 | 221,206 | 910 | 28 272 | 20 706 | 240,203 |
| 520 | 15 395 | 11 071 | 221,812 | 920 | 28 616 | 20 967 | 240,580 |
| 530 | 15 708 | 11 301 | 222,409 | 930 | 28 960 | 21 228 | 240,953 |
| 540 | 16 022 | 11 533 | 222,997 | 940 | 29 306 | 21 491 | 241,323 |
| 550 | 16 338 | 11 765 | 223,576 | 950 | 29 652 | 21 754 | 241,689 |
| 560 | 16 654 | 11 998 | 224,146 | 960 | 29 999 | 22 017 | 242,052 |
| 570 | 16 971 | 12 232 | 224,708 | 970 | 30 345 | 22 280 | 242,411 |
| 580 | 17 290 | 12 467 | 225,262 | 980 | 30 692 | 22 544 | 242,768 |
| 590 | 17 609 | 12 703 | 225,808 | 990 | 31 041 | 22 809 | 242,120 |

Annexe 7 : Composition massique des produits de l'air et des principales impuretés.

| composants | | Composition massique |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| NITROGENE | N ₂ | 78.1% |
| OXYGENE | O ₂ | 20.9% |
| ARGON | Ar | 0.9% |
| NEON | Ne | 18.2 ppm |
| HELIUM | He | 5.2 ppm |
| KRYPTON | Kr | 1.1 ppm |
| XENON | Xe | 0.09 ppm |
| Principales impuretés | | Composition moyenne |
| Eau | H ₂ O | Variable |
| Dioxyde de carbone | CO ₂ | 350 ppm |
| Hydrogène | H ₂ | 0.5 ppm |
| Hydrocarbures | C _n H _m | 2 ppm |

Annexe 8: Estimation du coefficient global d'échanger de chaleur

| Service | 25.4 mm OD Fintubes | | | |
|--|---------------------|-------------|-----------------|-------------|
| | 12.7mmx354/m | | 15.9mm by 394/m | |
| 1. Water & water solutions | | | | |
| Engine jacket water ($r_f = 0.0002 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$) | U_b 620 | U_x 43 | U_b 740 | U_x 35 |
| Process water ($r_f = 0.0004 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$) | 540 | 37 | 620 | 29 |
| 50-50 ethylene glycol- water ($r_f = 0.0002 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$) | 510 | 35 | 600 | 28 |
| 50-50 ethylene glycol- water ($r_f = 0.0004 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$) | 450 | 31 | 540 | 25 |
| 2. Hydrocarbon liquid coolers | | | | |
| Viscosity, mPa · s, at avg. temp. | U_b | U_x | U_b | U_x |
| 0.2 | 480 | 33 | 570 | 27 |
| 0.5 | 430 | 30 | 510 | 24 |
| 1.0 | 370 | 26 | 430 | 20 |
| 2.5 | 260 | 18 | 310 | 14 |
| 4.0 | 170 | 12 | 200 | 9.3 |
| 6.0 | 110 | 7.6 | 140 | 6.5 |
| 10.0 | 57 | 3.9 | 74 | 3.5 |
| 3. Hydrocarbon gas coolers | | | | |
| Pressure, kPa (ga) | U_b | U_x | U_b | U_x |
| 350 | 170 | 12 | 200 | 9.3 |
| 700 | 200 | 14 | 230 | 11 |
| 2100 | 260 | 18 | 310 | 14 |
| 3500 | 310 | 21 | 370 | 17 |
| 5200 | 370 | 26 | 430 | 20 |
| 7000 | 430 | 30 | 510 | 24 |
| 4. Air and flue-gas coolers Use one-half of value given for hydrocarbon gas coolers. | | | | |
| 5. Steam Condensers (Atmospheric pressure & above) | | | | |
| | U_b | U_x | U_b | U_x |
| Pure Steam ($r_f = 0.00009 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$) | 710 | 49 | 820 | 38 |
| Steam with non-condensibles | 340 | 23 | 400 | 19 |
| 6. Hydrocarbon condensers | | | | |
| *Condensing Range, °C | U_b | U_x | U_b | U_x |
| 0 | 480 | 33 | 570 | 27 |
| 6 | 450 | 31 | 540 | 25 |
| 14 | 430 | 30 | 510 | 24 |
| 33 | 370 | 26 | 430 | 20 |
| 56+ | 340 | 23 | 400 | 19 |
| 7. Other condensers | | | | |
| | U_b | U_x | U_b | U_x |
| Ammonia | 620 | 43 | 740 | 35 |
| Refrigerant R-12 | 370 | 26 | 430 | 20 |

Note: U_b is overall rate based on bare tube area, and U_x is overall rate based on extended surface.
*Condensing range = hydrocarbon inlet temperature minus hydrocarbon outlet temperature.

Actualité coefficients globaux de transfert de chaleur pour les refroidisseurs d'air