



Department of Process Engineering

قسم هندسة الطرائق

Ref :...../U.M/F.S.T/2024

رقم : ..... / ج.م.ك.ع.ت//2024

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie chimique

### Thème

**Optimisation du fonctionnement de la  
section de déshydratation du complexe  
GP1/Z**

Présentées par

1-Bouzidi Wissam

2- Denden Samia Chahinez

Soutenu le 13 /06 / 2024 devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	Mr Terkhi. MC	MCA	Université de Mostaganem
<b>Examineur :</b>	Mme Bendenia .S	Professeur	Université de Mostaganem
<b>Rapporteur :</b>	Mme Belhadji K.A	MCA	Université de Mostaganem
<b>Co-Encadreur</b>	Melle Benkrifa FZ	Doctorante	Université de Mostaganem

## *Remerciements*

On remercie tout d'abord Dieu Tout-Puissant, le Très Miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience pour achever cet humble travail, et dont la volonté est accomplie par les travailleurs et la louange et merci à celui qui nous a guidés sur le droit chemin

On remercie sincèrement notre encadrant madame BELHADJI AMEL enseignante à l'université de Mostaganem d'avoir accepté de superviser notre travail et on la remercie pour sa gentillesse et pour son appréciation et sa compréhension constante de notre situation et merci beaucoup pour vos conseils, votre soutien solide et vos encouragements inspirants.

Nos remerciements particuliers aux membres de jury, Monsieur TERKHI MC, enseignant à l'Université de Mostaganem d'avoir accepté de présider ce jury et Madame DRIOUCH A, d'avoir accepté d'examiner notre travail et de fournir un avis, un commentaire ou des conseils à ce sujet.

Sans oublier nos chers professeurs tout le long des années universitaires ainsi que les responsables du département de Génie de procédés, merci pour l'aide et les précieuses informations et l'expérience unique qu'on a vécu.

Enfin, un grand merci à nos collègues d'étude pour la belle et amusante compagnie, ainsi que pour les bons souvenirs, en particulier le respect mutuel.

## **DEDICASE**

*JE dédie ce projet :*

*A ma chère maman*

*A la plus merveilleuse personne du monde, ma très chère mère : tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Ta prière et ta bénédiction m'ont été un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.*

*A mon cher père*

*A mon cher père **KADDA** ; aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi.*

*Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.*

*Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

**A mes chers frères**

*A mes chers frères **FETHI** et **IYAD** en témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Vous êtes toujours dans mon cœur. Je vous remercie d'être l'épaule sur laquelle je peux toujours compter.*

*Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

## DEDICASE

*C'est avec....*

*Beaucoup de plaisir et d'émotion que j'ose maintenant écrire ces modestes mots.*

*Des mots que j'espère expriment ma profonde gratitude envers des personnes qui me sont proches, des personnes envers qui je dédie ce modeste travail.*

*Je dédie ce travail d'abord, à la plus merveilleuse personne sur terre, à ma chère Maman, celle qui m'a soutenue, m'a encouragé, et m'a appris à croire en moi et mes espoirs.*

*A mon père, mon chère ami, l'homme qui inspire mon existence et qui m'a à être moi-même*

*A ma famille, ma sœur **KHADIDJA**, mes frères **ISMAIL** et **NADJIB** qui sont le bonheur de mon cœur et la raison de ma vie.*

*A mes proches, avec qui j'ai partagé beaucoup de moment de joie, de tristesse, mais aussi des moments d'espoir, de bonheur et surtout d'aventure !*



**CHAHINAZ**

## Sommaire

listes des abréviations	
Listes des tableaux	
Listes de figures	
Resumé	
Introduction général .....	8
<b>chapitre I: Présentation du complexe GP1/Z et généralité sur les GPL</b>	
I.1 Présentation du complexe GP1/Z.....	10
I.1.1 Historique.....	10
I.1.2 Organisation du complexe .....	10
I.1.3 Principales installations du complexe .....	12
I.1.4 Utilités:.....	12
I.2 Généralités sur le gaz de pétrole liquéfié .....	13
I.2.1 Définition .....	13
I.2.2 Sources de GPL.....	13
I.2.3 Composition du GPL .....	13
I.2.5 Procédés d'obtentions du GPL.....	14
I.2.6 Domaine d'utilisation du GPL .....	15
I.2.7 Spécifications du propane et du butane commercial : .....	15
I-3 Procédé de fabrication .....	15
I-3-1 Section déshydratation .....	16
I-3-2 Section séparation.....	16
I.3.3 Section réfrigération.....	16
I.3.4 Section d'huile chaude .....	17
I.3.5 Section de stockage des produits finis .....	17
<b>chapitre II: Section déshydratation et tamis moléculaire</b>	
II.1 Déshydratation.....	19
II.1.1 Le but déshydratation .....	20
II.2 Le cycle de régénération .....	20
II.2.1 Drainage.....	20
II.2.2 Dépressurisation .....	21
II.2.3 Réchauffage .....	21
II.2.4 Refroidissement .....	22
II.2.5 Remise sous pression .....	23
II.2.6 Remplissage en liquide .....	24
II.3 Les Hydrates .....	24
II.3.1 Les structures des hydrates: .....	24

II.3.2 Les modes d'hydratation : .....	25
II.3.3 La zone de transfert de masse(ZMT) : .....	25
II.3.3.1 Concept de la zone de transfert de masse : .....	26
II.4 Les tamis moléculaires : .....	26
II.4.1 Description : .....	27
II.4.2 Formule chimique : .....	27
II.4.3 Régénération : .....	28
II.4.4 Paramètres de fonctionnement : .....	28
II.4.5 Les diamètres critiques pour chaque molécule : .....	29
<b>présentation du problème</b>	
<b>chapitre III: Calculs et interprétations</b>	
III.1 Constitution d'un déshydrateur de charge : .....	35
III.2 Les conditions opératoires d'adsorption / désorption: .....	35
III.3Température d'entrée du gaz de régénération: .....	35
III.4 La théorie de calcul: .....	35
III.4.1 Bilan énergétique: .....	35
III.4.1.1 Calcul de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération: .....	35
III.4.1.2 Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption de l'eau $Q_{des}$ : .....	36
III.4.1.3 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis $Q_{tamis}$ : .....	36
III.4.1.4 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier $Q_{acier}$ : .....	36
III.4.1.6 Calcul de la chaleur $H_f$ fournie par le four: .....	37
III.4.1.7 Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr »: .....	37
III.4.1.8 calcul de la chaleur fournie par le four par cycle « $H_f$ /cycle»: .....	37
III.4.1.9 Calcul du temps de refroidissement du tamis « tref » : .....	37
III.4.1.10 Calcul de la chaleur soutirée au système $Q_{ref}$ : .....	37
III.5.1 Le bilan de matière de la régénération: .....	37
III.5.2 Calcul de la chute de pression: .....	38
III.5.3 Calcul du nombre de Reynolds: .....	38
III.6 Validation de méthode: .....	38
III.6.1 Dimensionnement d'un déshydrateur: .....	39
III.6.1.1 Calcul de la quantité d'eau adsorbée: .....	39
III.6.2.1 Calcul du bilan thermique : .....	42
III.6.2.3 Récapitulation des résultats: .....	51
III.7 Etude de la première solution: .....	52
III.7.1Calcul le débit d'eau: .....	52
III. 7.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse: .....	52
III.7.3 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre: .....	52

III.7.4 Estimation de la quantité d'eau adsorbée M ads: .....	53
III.7.5 Calcul du temps d'adsorption:.....	53
III.7.6 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X):.....	53
III.7.7 Détermination de l'efficacité d'adsorption:.....	53
III.8.1 Calcul du bilan thermique: .....	54
III.9.1 Calcul du bilan de matière de la régénération: .....	55
III.9.2 Calcul des pertes de charges:.....	56
III.9.3 Interprétation des résultats : .....	58
III.10 Etude de la deuxième solution: .....	58
III.10.1 Calcul de débit d'eau:.....	58
III.10.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse : .....	58
III.10.3 Estimation de la quantité d'eau adsorbée M ads: .....	58
III.10.4 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre: .....	59
III.10.5 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X):.....	59
III.10.6 Détermination de l'efficacité d'adsorption:.....	59
III.10.7 Calcul du bilan thermique: .....	59
III.10.8 Calcul du bilan de matière de la régénération: .....	60
III.10.9 Interprétation des résultats:.....	61
III. 11 Explication et sélection de la solution optimale : .....	61
III.12 Comparaison entre les deux solutions optimales : .....	62
III.12.1 Première solution :.....	62
III.12.2 Deuxième solution :.....	63
III.3 Etude économique des résultats de la solution optimale: .....	65
III.13.1 Gain en gaz naturel:.....	65
III.13.2 Gain en vie du tamis moléculaire: .....	66
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>68</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>69</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>.....</b>

## Liste des abréviations

GPL : gaz pétrole liquéfié

GN : gaz naturel

Ppm : partie par million

CH<sub>4</sub> : méthane

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> : éthane

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> : propane

C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> : butane

C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> : pentane

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les caractéristiques du propane et du butane commercial du GP1/Z

Tableau II.1 : Paramètres de température, de pression et de temps pour le cycle de régénération

Tableau II.2 : Fiche technique de tamis moléculaire

Tableau II.3 : Les paramètres de fonctionnement

Tableau II.4 : Diamètres de certaines molécules

Tableau III.1 : La fiche technique de tamis moléculaire

Tableau III.2: La composition de la charge du GPL

Tableau III.3 : La composition de gaz de régénération

Tableau III.4 : Représentation des données de réchauffage du tamis

Tableau III.5 : Représentation des valeurs de design et des valeurs calculée

Tableau III.6 : La variation du temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau pour un temps de régénération fixé

Tableau III.7 : La variation du temps de régénération en fonction de la teneur en eau pour un temps d'adsorption fixé

Tableau III.8 : Le gain annuel en GN et en vie des tamis pour le cycle calculée

## Liste des figures

Figure I.1 : Organigramme de complexe GP1/Z

Figure I.2 : la structure chimique du butane et propane

Figure I.3 : la structure chimique du butane et propane

Figure II.1 : Séquence de drainage

Figure II.2 : Séquence de dépressurisation

Figure II.3 : Séquence de chauffage

Figure II.4 : Séquence de refroidissement

Figure II.5 : Séquence de pressurisation

Figure II.6 : Séquence de remplissage

Figure II.7 : La zone ZMT

Figure II.8 : Tamis moléculaire sous différents formes

Figure II.9 : la variation de la teneur en eau durant les mois (janvier et février)

Figure III.1 : Le temps d'adsorption en fonction de la teneur d'eau

Figure III.2 : Le nombre de régénération par an en fonction de la teneur en eau

Figure III.3 : Le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau

Figure III.4 : Quantité de GN de régénération en fonction de la teneur en eau

**Résumé :**

La présence de l'eau dans le gaz naturel peut causer des problèmes dans le traitement et aussi dans le transport, pour éviter ses problèmes on applique plusieurs types de déshydratation. Suite à la qualité de la charge de GPL de complexe GP1/Z et la variation de la teneur en eau. Dans ce travail, nous étudions l'optimisation de la section de déshydratation de GPL par tamis moléculaire (adsorption) pour avoir une meilleure exploitation des tamis et l'augmentation de la durée d'utilisation de ces derniers. Un temps plus grand d'adsorption entraîne un gain en énergie puisque la même quantité de gaz naturel que pour le cycle d'adsorption actuel sera dépensée pour un cycle plus long. En plus du gain obtenu en GN, un gain supplémentaire sera réalisé dans : la durée de vie de tamis moléculaire qui va être plus longue, le nombre de régénération serait moindre donc le tamis sera moins exposé à des hautes températures lors de la séquence de chauffage. La durée de vie du matériel sera plus longue du fait qu'avec un nombre de cycles moins important, le matériel sera exposé à moins de contraintes de pression et de températures.

**Mots clés:** Gaz-Déshydratation- tamis moléculaire- déshydrateur-adsorption.

**Abstract**

The presence of water in natural gas can cause problems in processing and transportation, and several types of dehydration are used to avoid these problems. As a result of the quality of the GP1/Z complex LPG feedstock and the variation in water content. In this work, we study the optimization of the dehydration section of LPG by molecular sieve (adsorption) to have a better exploitation of the sieves and increase their useful life.

A longer adsorption time results in a gain in energy since the same amount of natural gas as for the current adsorption cycle will be spent for a longer cycle. In addition to the GN, an additional gain will be realized in : the life of the sieve will be longer, the number of regeneration would be less so the sieve will be less exposed to high temperatures during heating sequence. The life expectancy of the equipment will be longer due to the fact that with a smaller number of cycles, the material will be exposed to less pressure constraints and temperature constraints.

**Key words:** Gas-Dehydration-Molecular seive-Dehydrator-adsorption.

## ملخص

يمكن أن يسبب وجود الماء في الغاز الطبيعي مشاكل في المعالجة والنقل، وتستخدم عدة أنواع من التجفيف لتجنب هذه المشاكل. ونتيجة لجودة المادة الأولية لغاز البترول المسال المعقد GPI/Z والتباين في المحتوى المائي. ندرس في هذا العمل تحسين قسم تجفيف غاز البترول المسال بواسطة المنخل الجزيئي (الامتزاز) للحصول على استغلال أفضل للمناخل وزيادة عمرها الإنتاجي .

يؤدي وقت الامتصاص الأطول إلى زيادة في الطاقة حيث يتم إنفاق نفس كمية الغاز الطبيعي كما هو الحال مع دورة الامتصاص الحالية لدورة أطول في الغاز الطبيعي، سيتم تحقيق ربح إضافي في : حياة الغربال ستصبح أطول ،سيكون عدد التجديد أقل و بالتالي فإن الغربال سيكون أقل عرضة لدرجات الحرارة المرتفعة خلال سلسلة التدفئة ، سوف يكون العمر المتوقع للمعدات أطول بسبب وجود عدد أقل من دورات التجديد ، ستعرض المادة القيود ضغط أقل و قيود درجات الحرارة أقل

**الكلمات المفتاحية:** غاز-الجفاف-المنخل الجزيئي-المجفف-امتزاز.

## Introduction général

Le complexe de Production du gaz pétrole liquéfié (GPL) dénommé **GP1Z** ou "**JUMBO GPL**" de l'Entreprise Nationale **SONATRACH** est le dernier né des Ensembles Industriels de la zone d'Arzew. Il est situé entre la Centrale Thermique Marsa El Hadjadj à l'Est et les Complexes de gaz naturel liquéfié (GNL) à l'Ouest.

Le GPL, dont l'Algérie est l'un des leaders producteurs exportateurs dans le monde, constitue l'une des priorités des plans de développement et de la politique énergétique de la **SONATRACH**. Le Complexe a pour mission de produire du Butane; Propane et du mélange Butane/Propane à partir du GPL provenant du grand Sud Algérien: Complexe Hassi Messaoud, Hassi R'Mel, Ain Amenas... etc. La Capacité annuelle de production de l'Usine est de 10,8 millions de Tonne par an. Le **GP1/Z** fait occuper une place de choix à la **SONATRACH** dans le marché national et international des GPL.

Dans ce cadre, **SONATRACH** dispose déjà d'importantes installations de production, de transport et de séparation des GPL permettant leurs valorisations et leurs commercialisations aussi bien sur le marché local qu'international. Mais, Il serait toujours indispensable d'opter pour une exploitation maximale de cette capacité installée, à des limites tolérables, ce qui sera bénéfique sur le plan économique (coût /revenu) et sur la gestion de la production (flexibilité et entretien). Ceci nous a amené à effectuer une étude dans ce contexte.

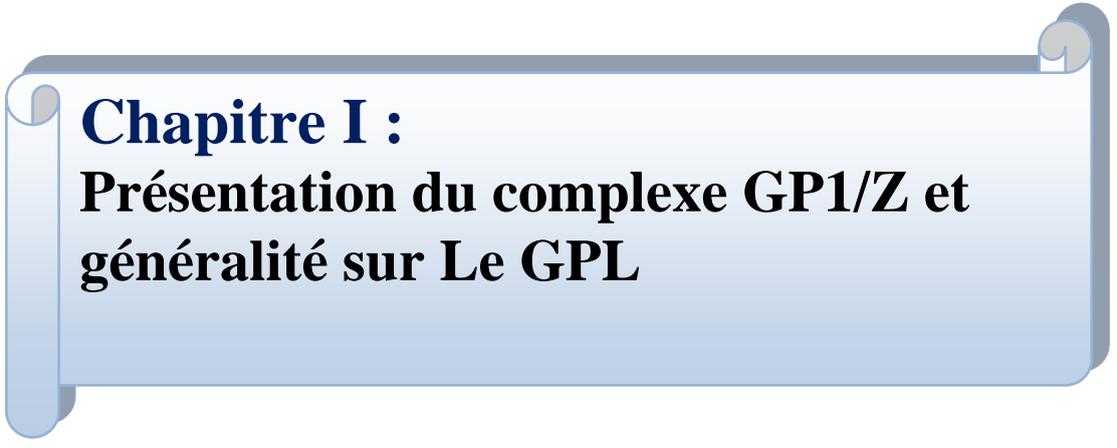
L'objectif de notre travail au niveau du complexe **GP1Z**, est d'étudier les performances de la section séparation pour une augmentation de capacité de traitement supérieur à 100% et vérifier la quantité de chaleur par la capacité installée, en respectant les spécifications des produits finis éthane, propane et butane.

Notre manuscrit comprend deux parties :

La première partie porte sur une présentation du complexe **GP1Z** et des généralités sur les GPL, suivi par une description du procédé de séparation du GPL, et enfin des généralités sur les colonnes de distillation.

La seconde partie est consacrée à l'étude pratique basée sur la simulation de différents cas, avec une comparaison et interprétation des résultats.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion dans laquelle les résultats trouvés sont récapitulés, suivie de quelques perspectives.



**Chapitre I :**  
**Présentation du complexe GP1/Z et  
généralité sur Le GPL**

Le sud algérien est riche en hydrocarbures. Ces gisements produisent une large gamme de produits, dont le pétrole et le gaz. Pour séparer ces produits et leurs dérivés, l'Algérie a investi des sommes colossales dans des complexes de traitement. Ces complexes sont répartis en plusieurs unités, comme le complexe GP1/Z.

## **I.1 Présentation du complexe GP1/Z**

### **I.1.1 Historique**

Le complexe GP1/Z est un complexe de liquéfaction de gaz naturel appartenant à l'entreprise nationale SONATRACH. Il est situé à Arzew, en Algérie, et s'étend sur une superficie de 120 hectares.

Le complexe a été construit en trois phases, avec la participation d'un consortium japonais. La première phase a été achevée en 1984, la deuxième en 1998 et la troisième en 2010.

En 1983, le complexe disposait de quatre trains de traitement GPL, ce qui lui permettait de produire 4,8 millions de tonnes par an. Suite à l'acquisition de deux trains supplémentaires en 1998, la production a augmenté pour atteindre 7,2 millions de tonnes par an. Après le démarrage de la troisième phase, la production est estimée à 10,8 millions de tonnes par an.

Le complexe a pour objectif de traiter le GPL brut provenant des champs gaziers du sud algérien pour produire du propane et du butane, destinés au marché national et international. Il est surnommé "JUMBO-GPL" en raison de ses grandes capacités de production. [1]

### **I.1.2 Organisation du complexe**

La description des structures nous permet de comprendre le fonctionnement du complexe GP1/Z. Le complexe est organisé en fonction de sa situation géographique, de son effectif, des objectifs et du rôle de chaque département.

L'organigramme du complexe est composé d'une direction générale, de deux sous-directions et de départements de contrôle. La direction générale est responsable de la gestion globale du complexe. Elle est composée d'un directeur général, d'un directeur adjoint et d'un secrétaire général. [1]

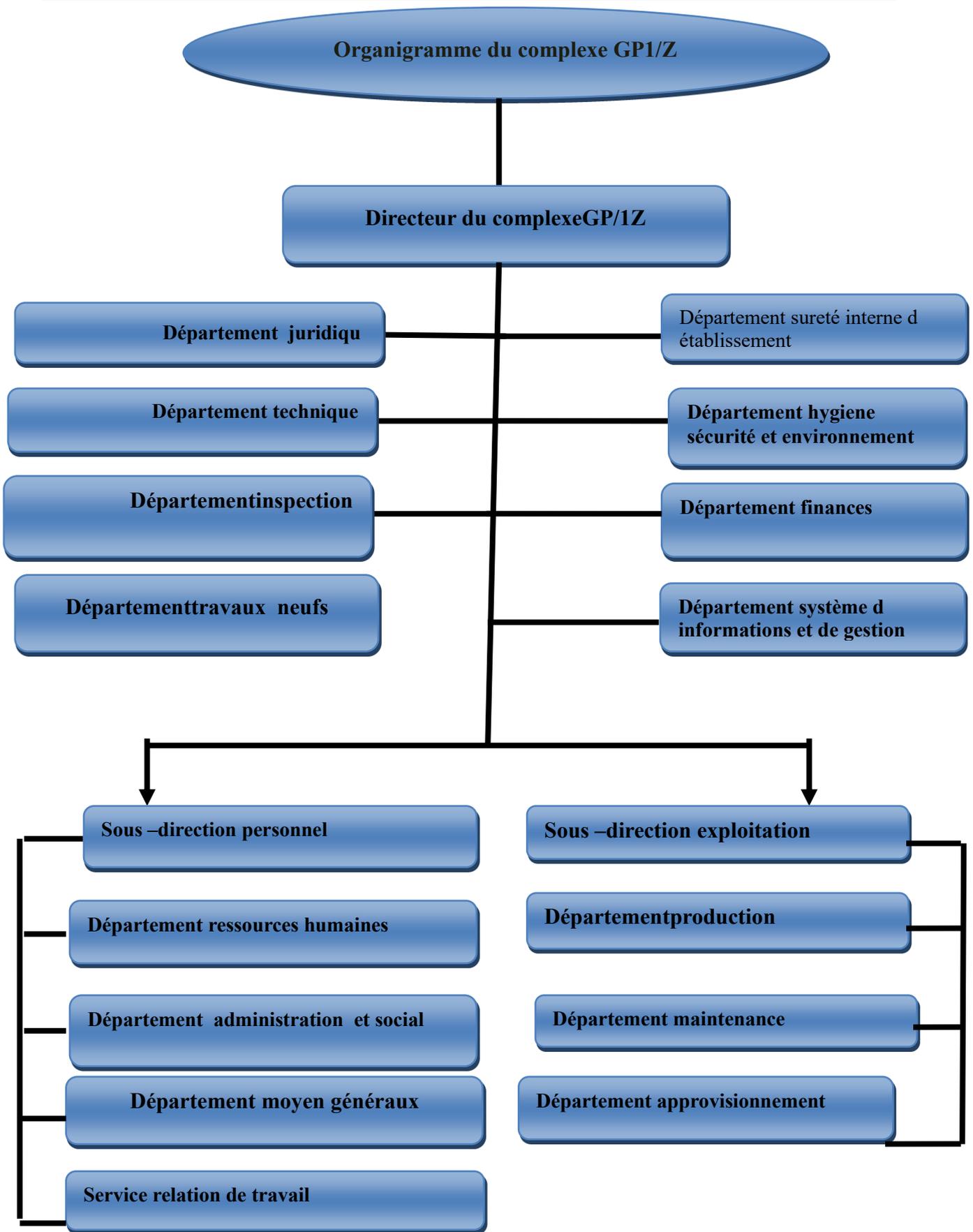


Figure I-1: organigramme du complexe GP1Z

### I.1.3 Principales installations du complexe

Les principales installations du complexe GP1/Z sont:

- 09 Trains de traitement du GPL.
- 02 unités de liquéfaction des boil-off.
- 22 Sphères de stockage de la charge d'alimentation de 1000 m<sup>3</sup> chacune.
- 04 Bacs de stockage de propane basse température de 70000 m<sup>3</sup> chacune.
- 03 Bacs de stockage de butane basse température de 70000 m<sup>3</sup> chacune.
- 01 Bacs de stockage de butane propane basse température de 70000 m<sup>3</sup>
- 04 Sphères de stockage de produits ambiants (propane et Butane) de 500m<sup>3</sup> chacune.
- 01 Sphères de stockage gazoline de 500 m<sup>3</sup>.
- Unité de démercurisation.
- 05 salles de contrôle.
- 01 Station électrique alimentée par SONELGAZ.
- 04 Générateurs assurant l'énergie de secours du complexe.
- 02 Quais de chargement pouvant recevoir des navires d'une capacité variante entre 4000 et 5000 tonnes.
- Une rampe de chargement de camions.
- Une station de pompage d'eau de mer.
- Un système de télésurveillance. [1]

### I.1.4 Utilités :

L'usine utilise plusieurs utilités pour fonctionner :

- Combustible : Gaz naturel
- Air
- Air instrument: air séché pour la manipulation des vannes et la régulation

- Air service: air pour le nettoyage et l'entretien
- Vapeur: produite à partir d'eau distillée
- Eau: Eau distillée, Eau de refroidissement, Eau potable
- Méthanol: pour le dégivrage
- Gasoil: pour les générateurs de secours
- Azote:
- Circuit gazeux (HELIOS)
- Circuit d'azote liquide (COGIZ) transformé en vapeur pour l'inerte des équipements [1]

## I.2 Généralités sur le gaz de pétrole liquéfié

### I.2.1 Définition

Le GPL est un mélange d'hydrocarbures légers, principalement du propane et du butane. Dans des conditions normales de pression et de température, le GPL est à l'état gazeux. Cependant, il peut être facilement liquéfié à la température ambiante sous une pression moyenne de 4 à 18 bars. Cette propriété permet un stockage et un transport plus simples par rapport aux gaz qui exigent des pressions très élevées (méthane, éthane).

### I.2.2 Sources de GPL

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) provient de deux sources principales :

**Raffinage du pétrole:** environ 40% des ressources mondiales de GPL proviennent du raffinage du pétrole brut.

**Traitement du gaz naturel:** environ 60% des ressources mondiales de GPL proviennent du traitement du gaz naturel.

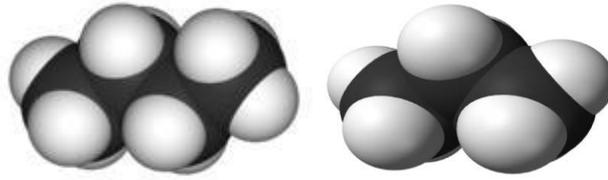
### I.2.3 Composition du GPL

Le GPL est composé d'environ :

- ✓ 80% de butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)

- ✓ 20% de propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)

La structure chimique des deux composants principaux du GPL est représentée ci-dessous (Figure I.2 et I.3) :



**Figure I.2 et I.3 :** La structure chimique du butane et propane.

### I.2.5 Procédés d'obtentions du GPL

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est principalement obtenu à partir de trois sources :

#### 1. Raffineries de pétrole brut:

- **Distillation du pétrole brut:** Le GPL est extrait lors de la distillation du pétrole brut en différents produits.
- **Cracking et reforming:** Le GPL peut également être produit lors du cracking ou du reforming de produits pétroliers plus lourds.

#### 2. Séparation de l'essence du gaz naturel:

Le GPL est extrait du gaz naturel lors de la séparation de l'essence.

Les condensats (propane, butane, essences légers) sont ensuite collectés.

#### 3. Récupération directe des gaz séparés du brut:

- Le GPL peut être récupéré directement des gaz séparés du pétrole brut dans les champs de production.
- Il s'agit des gaz associés au pétrole.

### I.2.6 Domaine d'utilisation du GPL

Les GPL sont promis à un bel avenir car la demande mondiale continue à croître, que ce soit pour la pétrochimie ou pour leurs utilisations traditionnelles en tant que combustible. Parmi les utilisations des **GPL**, on peut citer :

#### a) Applications domestiques :

Le principal domaine d'utilisation du GPL est le chauffage et la climatisation domestiques. Il représente une source d'énergie propre et efficace pour les foyers, avec des avantages tels que:

- Combustion propre: Le GPL produit moins d'émissions polluantes que d'autres combustibles fossiles comme le charbon ou le fioul.
- Efficacité énergétique: Le GPL a un pouvoir calorifique élevé, ce qui signifie qu'il produit plus d'énergie par unité de volume que d'autres combustibles.
- Facilité d'utilisation: Le GPL est facile à stocker et à transporter, ce qui le rend pratique pour les applications domestiques.
- Coût abordable: Le GPL est généralement moins cher que d'autres combustibles domestiques comme l'électricité ou le gaz naturel.

### I.2.7 Spécifications du propane et du butane commercial :

Les spécifications du propane et butane commercial sont données dans le tableau suivant (Tableau I.1) [2] :

**Tableau I.1** : Les caractéristiques du propane et du butane commercial du GP1/Z.

Caractéristiques	Le propane	Le butane
Masse molaire (g/mole)	44	58
Densité à 15 °C	0,5068	0,5772
Tension vapeur relative à 37,8 °C (Kg/cm <sup>2</sup> )	12,7	3,1
Teneur en eau	Absence d'eau	Absence d'eau
Point d'ébullition à 760 mm Hg (°C)	- 40	0

### I-3 Procédé de fabrication

Le GPL venant de l'extérieur est stocké dans 22 réservoirs sphériques dans la section de stockage de la charge, ensuite le GPL brut est acheminé vers les 9 trains identiques installés

en parallèles .Chaque train peut produire 1.200.000 de tonnes /AN et comprend les sections suivants : [1]

### **I-3-1 Section déshydratation**

Cette section a pour but de réduire la teneur en eau dans le déshydrater de charge de 100 ppm à 5 ppm et dans le déshydrater de garde (section réfrigération) de 5 ppm à environ 1 ppm pour éviter la formation de givre dans les équipements utilisés. [1]

### **I-3-2 Section séparation**

Le GPL résultant de la section de déshydratation est introduit dans le fractionner au débit nécessaire pour obtenir la quantité de produit requise. [1]

#### **Passage par les préchauffeurs :**

Le GPL issu entre dans le fractionnateur à une température 71°C après un passage par trois préchauffeurs.

- **Fractionnateur**

C'est une colonne de séparation de 55 plateaux à clapets. C'est dans Cette colonne que l'on opérer la récupération de l'Ethane et le propane en tête .pendant que le Butane et le Pentane seront récupérés en fond. Le produit de tête de fractionnateur est envoyé vers le dé-éthaniseur au moyen d'une pompe de reflux qui garantit en même temps la charge de dé-éthaniseur et le reflux du fractionnateur. Le butane sortant du fond est porté vers la section de réfrigération.

- **Dé-éthaniseur**

C'est une colonne de fractionnement équipée de 25 plateaux à clapets, est utilisée dans le processus d'élimination de l'éthane contenu dans le propane .L'éthane est récupéré en tête de la colonne tandis que le propane est extrait au fond de la colonne.

- **Dépentaniseur**

C'est une colonne de fractionnement avec 50 plateaux à clapets .Cette colonne est utilisée pour éliminer le pentane contenu dans le butane et ceci selon la teneur en pentane de la charge d'alimentation .Elle fonctionne seulement si la teneur en butane dans la charge dépasse 10 %

### **I.3.3 Section réfrigération**

Le refroidissement du lit se fait du fond vers le haut, c'est-à-dire en sens opposé du chauffage .pour la séquence de refroidissement, on fait appel au gaz naturel froid (12.7°C)

Pour commencer le refroidissement, on ouvre les vannes N005 et N009 et TS-2 est mis en service. Les vannes N007 et N010 restent ouvertes après la séquence de chauffage et E-1001 reste en service.

Le flux de gaz froid entrant dans le lit est maintenu par un contrôleur de débit. Le refroidissement se fait en 5 heures et sa fin est signalé par TS-2 qui indique que le dessus du lit s'est suffisamment refroidi (45°C) et le gaz utilisé pendant la séquence continue à s'écouler vers le réseau de fuel gaz (gaz naturel)

A la fin de la séquence les vannes du lit se ferment et TS-2 est mis hors service. [1]

### **I.3.4 Section d'huile chaude**

Une boucle fermée est créée par le circuit du fluide qui comprend un ballon d'expansion, une pompe de circulation et un four. Le fluide caloporteur circule vers les différents consommateurs de calories du four. [1]

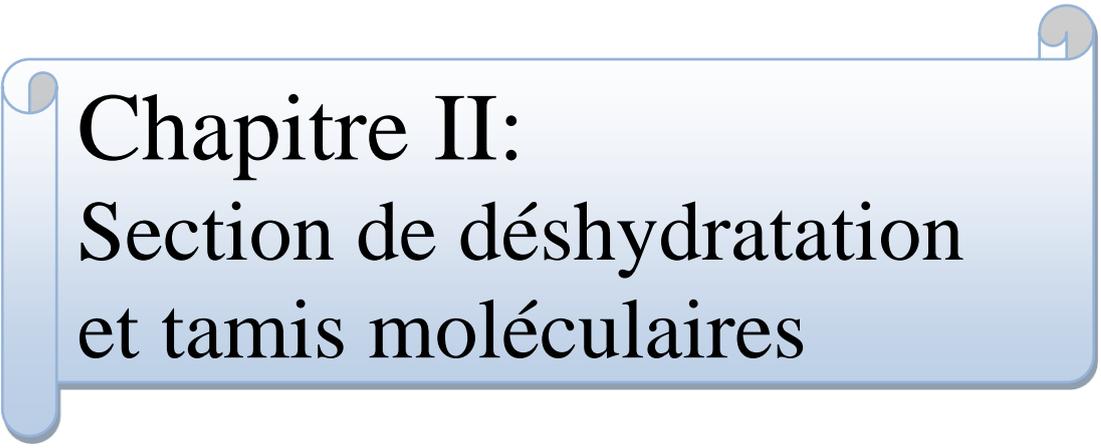
### **I.3.5 Section de stockage des produits finis**

Elle s'évertue du stockage des produits finis et leur expédition par navires et camions.

On distingue deux types de stockage :

\* **Stockage à basse température** : pour le marché international, du gaz réfrigéré (propane et butane) est acheminé vers les bacs où il sera stocké à basse température. Chaque bac a une capacité de 70.000 m<sup>3</sup> et est équipé de pompes immergées pour la circulation du gaz et le chargement des navires.

\* **Stockage à température ambiante** : pour le marché national ; le chargement camions se fait à partir des quatre sphères ayant une capacité de 500m<sup>3</sup> chacune dans lesquelles sont stockés le propane et le butane sous pression [1]



**Chapitre II:**  
Section de déshydratation  
et tamis moléculaires

La présence d'eau peut provoquer divers problèmes de fonctionnement en fonction des conditions de température et de pression dans l'installation; si le gaz contient des composants acides, la vapeur d'eau peut se condenser et provoquer la formation, la solidification ou la corrosion d'hydrates. Afin d'éviter ces phénomènes, il est nécessaire d'utiliser une technologie de traitement appropriée pour réduire la teneur en eau du gaz naturel. La déshydratation du GPL s'effectue par différents types de processus : absorption, adsorption, etc. Nous verrons la déshydratation par adsorption ci-dessous. La déshydratation en phase liquide de la charge consiste en deux tours d'adsorption fonctionnant en parallèle, alternativement et périodiquement.

À tout moment, une colonne est en ligne pour effectuer l'adsorption et l'autre colonne est en train de se régénérer. La durée d'adsorption est de 24 heures, mais elle est modifiée en fonction des caractéristiques du GPL importé jusqu'à 36 heures, elle se termine à ce moment et la tour de secours est mise en service. La tour utilisée entre en état de régénération. Lors de l'adsorption, le flux à travers la colonne se fait de bas en haut. Le fonctionnement de la section de déshydratation des aliments est effectué en continu, automatiquement et en séquence sous le contrôle d'une minuterie et d'un contrôleur matriciel de circulation.

## II.1 Déshydratation

Si les conditions de température et de pression d'une installation sont régulées, la vapeur d'eau peut se condenser et provoquer la formation d'hydrates, la solidification ou la corrosion. Il est impératif d'utiliser des méthodes de traitement appropriées pour réduire la teneur en eau du gaz naturel afin d'éviter ces événements.

La plus courante méthode c'est : **la déshydratation**

Trois colonnes d'adsorption constituées de tamis moléculaires fonctionnent en parallèle dans la section de déshydratation. Une colonne est en ligne pour l'adsorption, une autre en régénération tout moment, pendant que la troisième est en stock.

Après 36 heures d'adsorption, la colonne en réserve est mise en ligne et la colonne en service passe en régénération. La troisième colonne passe en réserve lorsque son cycle de régénération est terminé. Pendant l'adsorption, l'écoulement se déplace de bas en haut à travers la colonne. Il est également important de noter que la section déshydratation de charge peut fonctionner avec seulement deux Adsorbants, ce qui signifie qu'une colonne peut être modifiée pendant que les deux autres colonnes ne peuvent pas.

Le fonctionnement de la section déshydratation de l'alimentation est en contenu, automatique et en séquence sous la commande d'un programmeur, le contrôleur matriciel du cycle.

### II.1.2 Le but déshydratation

- \* Risque de corrosion des pipes (surtout en présence de gaz acide).
- \* Risque de formation des hydrates.
- \* Risque de solidification dans les procédés cryogéniques

## II.2 Le cycle de régénération

Ce cycle se fait en plusieurs séquences les quelles : Le drainage, la dépressurisation, le réchauffage, le refroidissement, la pressurisation, et on termine par le remplissage en liquide [3]. Le tableau (II.1) englobe les paramètres de température, de pression, et de temps pour le cycle de régénération

**Tableau (II.1) : Paramètres de température, de pression et de temps pour le cycle de régénération.**

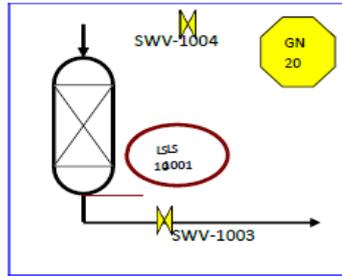
Etapes	Temps (h)	P (bar) (Kg/cm <sup>2</sup> )	T (°C)
Drainage	1	20	30
Dépressurisation	0.5	3.5	30
Réchauffage	11	3.5	280
Refroidissement	5	3.5	12.7
Pressurisation	0.5	20	45
Remplissage	1	3	30

### II.2.1 Drainage

Lorsque V-1001B est connecté, la vanne 2A se ferme. La séquence de régénération commence après la fermeture de cette vanne avec le drainage du GPL restent dans la colonne d'adsorption. La pression du gaz naturel est utilisée pour évacuer le GPL brut vers les réservoirs sphériques d'alimentation, (20 Kg/S) introduit au sommet de la colonne. Les vannes 3A et 4A s'ouvrent pour refouler le GPL vers les réservoirs sphériques d'alimentation en état liquide. A ce stade, un contact de niveau est en service sur LS-1.

Après cela, le processus de drainage est terminé et LS-1 est mis hors service.

Le temps de drainage est d'environ 50minutes. [3]



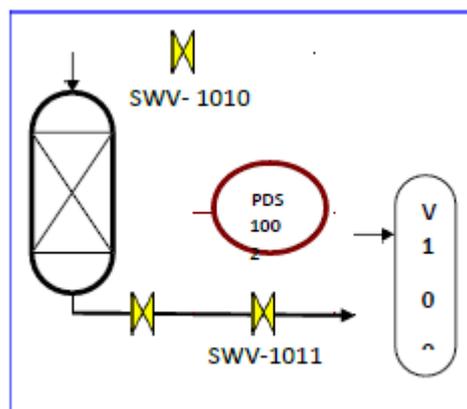
**Figure II.1:** séquence de drainage

### II.2.2 Dépressurisation

La pression de V-1001 A est de 20 Kg/cm<sup>2</sup>. Après drainage complet de la colonne d'adsorption, cette pression doit être appliquée avant que la séquence de chauffage ne puisse commencer

Soit diminué à 3.5 kg /cm<sup>2</sup> efficacement. Lorsque les vannes 3A et 4A sont fermées, la commande automatique chronologique ouvre la vanne 11 et ensuite la vanne 7A, mettant en service le contact de pression différentielle, PDS-2. V-1001A est alors lentement pressurisé vers le réseau fuel gazeux.

Lorsque PDS-2 indique qu'il n'y a pas de débit, la vanne 11 se ferme automatiquement mais la vanne 7A reste ouverte. Ensuite, la pression de la colonne est de 3.5 Kg/cm<sup>2</sup>. Il faut environ 30minute pour dépressuriser. [3]



**Figure II.2:** Séquence de dépressurisation

### II.2.3 Réchauffage

La séquence de réchauffage est la principale étape de la séquence de régénération car l'eau adsorbée est complètement éliminée des tamis moléculaire. En utilisant du gaz naturel chaud,

qui a été porté à 280°C dans le four de fluide caloporteur, le lit de tamis moléculaire est chauffé du haut vers le bas. Les vannes 8,6 et 10 doivent être ouvertes pour démarrer la séquence de réchauffage. Pour éliminer l'eau entraînée, le contrôleur de débit dans la canalisation de gaz chaud introduit un débit constant de gaz dans le lit, qui s'échauffe lentement.

La fonction de l'aéroréfrigérant E-1001 est de refroidir le gaz sortant du lit et de condenser une partie de l'eau contenue dans le gaz. Le gaz refroidi entre dans le séparateur de drainage V-1002, où l'eau libre est séparée et s'écoule vers les égouts des eaux huileuses sous contrôle du niveau.

Le gaz refroidi est transféré au réseau de fuel gaz. Le condensat d'hydrocarbure qui peut se former au-dessus du niveau de l'eau libre est envoyé vers le réseau de purge sous contrôle de niveau. Il est également possible d'envoyer directement le gaz refroidi à la torche, avec une pression, régulée.

11 heures sont nécessaires pour la période de chauffage. Ensuite le programmeur et le TS-1 arrêtent le cycle après avoir atteint la température de régénération du lit à 250°C. [3]

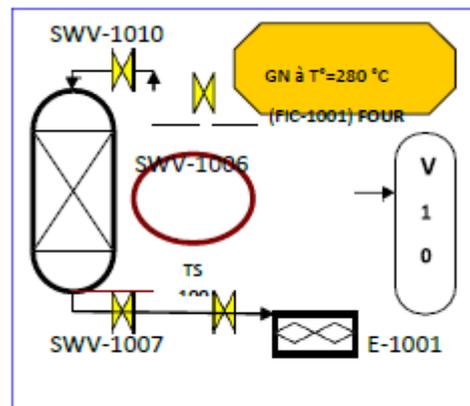


Figure II.3: Séquence de chauffage

## II.2.4 Refroidissement

Le processus de refroidissement du lit est effectué du bas vers le haut, en sens opposé à celui du réchauffage. Le gaz naturel froid (12.7°C) est utilisé pour la séquence de refroidissement, les vannes 5 et 9 s'ouvrent pour démarrer le refroidissement et le TS-2 commence à fonctionner. Après la séquence de chauffage, les vannes 7A et 10A restent ouvertes et E-1001 reste en service.

Un contrôleur de débit maintient le flux de gaz froid entrant dans le lit. Le processus de refroidissement nécessite 5 heures et est signalé par TS-2 lorsque le dessus du lit a été

suffisamment refroidi ( $45^{\circ}\text{C}$ ). Le gaz utilisé pendant la séquence de refroidissement continue à s'écouler vers le réseau de gaz de combustion.

Les vannes du lit 9 et 7A et 5 se ferment après refroidissement et le TS-2 est mis hors service.[3]

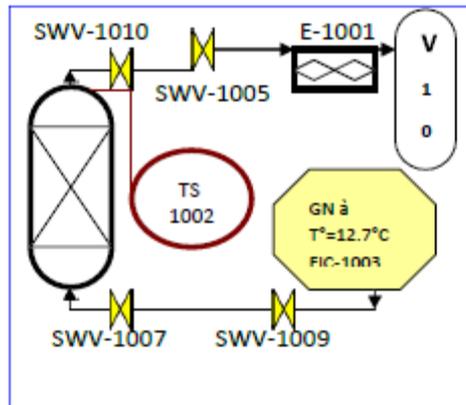


Figure II.4: Séquence de refroidissement

### II.2.5 Remise sous pression

Pour éviter la détente du GPL brut, V-1001A doit être remis sous pression par du gaz naturel ( $20\text{Kg}/\text{cm}^2$ ) avant de pouvoir réintroduire du GPL liquide dans la colonne, et par conséquent la perte du produit.

Pour la remise sous pression, une basse pression de gaz naturel est introduite dans la colonne. Les vannes 13 et 4A s'ouvrent automatiquement et PDS-3 commence à fonctionner.

Dans la colonne, la pression augmente jusqu'au point de tarage de PDS-3. La vanne 4A se ferme alors, ce qui entraîne la mise hors service de PDS-3. La pression effective de V-1001A atteint alors  $20\text{ Kg}/\text{cm}^2$ .

La remise sous pression dure environ une demi-heure. [3]

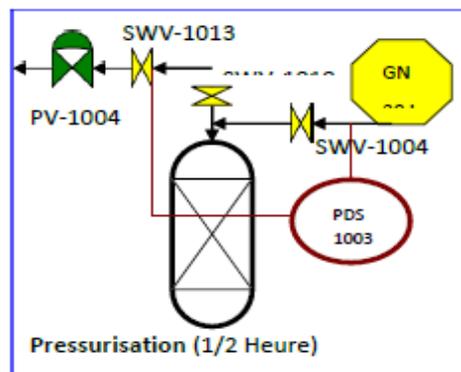


Figure II.5: Séquence de pressurisation

### II.2.6 Remplissage en liquide

Le GPL liquide peut être réintroduit dans la colonne après remise sous pression sans détente, au fur à mesure que le GPL liquide remonte dans la colonne, le gaz est refoulé sous contrôle de pression en tête. La vanne 12 A se ferme lorsque le niveau de liquide atteint LS-2. Cela prend environ une heure.

V-1001A est maintenant dans la réserve après avoir terminé le cycle de régénération. Normalement il y a 53 heures de disponibilité en réserve.

La période de régénération totale est de 19 heures.

En 17 heures, le cycle d'adsorption de V-1001B est terminé et son cycle de régénération commence. Tandis que V-1001A reste en réserve, V-1001C est connecté et commence son cycle d'adsorption. [3]

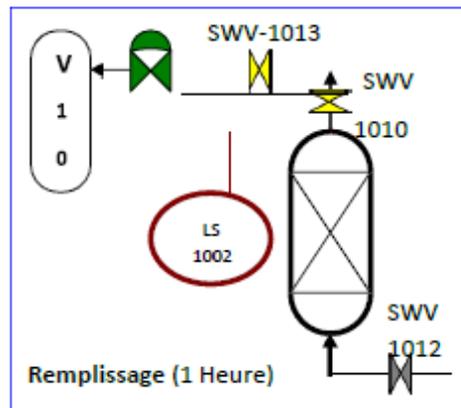


Figure II.6: Séquence de remplissage

## II.3 Les Hydrates

Les hydrates sont des composés chimiques formés par l'union d'une molécule d'eau (H<sub>2</sub>O) avec une autre molécule, appelée "molécule hôte". Cette union est généralement due à des forces intermoléculaires de type liaisons hydrogène. [4]

### II.3.1 Les structures des hydrates:

Il y a deux structures pour les hydrates des GPL.

Des petites molécules qui forment des corps cubiques centrés (structure I) tels que (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>S) et des grandes molécules tels que (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) qui ont la forme d'un diamant (structure II)

### II.3.2 Les modes d'hydratation :

Les procédés de déshydratation du GPL peuvent être divisés en trois catégories :

\* **Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates:** L'inhibition par injection d'inhibiteur est une méthode de prévention de la formation d'hydrates dans le GPL. Cette méthode consiste à injecter dans le GPL des produits chimiques qui perturbent la formation des cristaux d'hydrates.

\* **Déshydratation par absorption dans le liquide:** La déshydratation par absorption dans le liquide est une méthode de déshydratation du GPL qui consiste à mettre en contact le GPL avec un liquide déshydratant qui absorbe l'eau.

\* **Adsorption sur un agent desséchant solide activé:** L'adsorption sur un agent desséchant solide activé est une méthode de déshydratation du GPL qui consiste à faire passer le GPL à travers un lit d'agent desséchant solide qui retient l'eau par adsorption. [2], [4]

### II.3.3 La zone de transfert de masse(ZMT) :

Zone de transfert de masse (ZMT) : [5], [4] L'adsorption est un phénomène de transfert de masse qui nécessite un temps limité pour transférer les molécules du liquide porteur vers les pores adsorbants. L'impact cette fois-ci est : Ø Concentration (quantité d'adsorbat à transférer). Ø Présence de molécules concurrentes ou interférentes. Ø L'ouverture des canaux de diffusion internes (micropores) des particules adsorbants, et la taille des pores du courant adsorbant. Lors du transfert de tout composant de la phase gazeuse à la phase solide, la longueur du lit traversé par le gaz supplémentaire est appelée zone de transfert de masse (MTZ). (Voir Figure 2.1). En **fait**, la ZMT est une région qui précède la zone dite d'équilibre. La zone de transfert de masse est égale à 1/3 de la zone de saturation, Il est courant d'ajouter 0,3 à 0,6 m de déshydratant au fond du lit par mesure de sécurité pour éviter que les points d'arrêt ne sortent du lit. [5], [4]

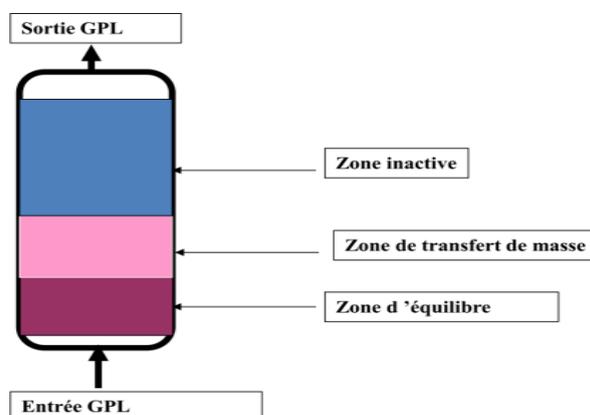


Figure II.7: La zone ZMT

### II.3.3.1 Concept de la zone de transfert de masse :

La zone de transfert de masse correspond à la longueur du lit d'adsorbant nécessaire pour que le phénomène d'adsorption s'effectue de manière optimale. Dans cette zone, la concentration de l'adsorbat (la substance à adsorber) varie en fonction de sa concentration initiale. [5]

- **En amont de la zone de transfert:** L'adsorbant est saturé par l'adsorbat et ne peut plus en fixer davantage.
- **En aval de la zone de transfert:** L'adsorbant est vierge ou régénéré et est prêt à capturer l'adsorbat.

Facteurs influençant la zone de transfert de masse:

- **Cinétique d'adsorption:** Détermine la vitesse à laquelle l'adsorbat est capté par l'adsorbant.
- **Caractéristiques thermodynamiques du fluide:** Influencent l'affinité entre l'adsorbat et l'adsorbant.
- **Vitesse linéaire superficielle:** Détermine la vitesse à laquelle le fluide traverse le lit d'adsorbant.
- **Type, forme et granulométrie du tamis moléculaire:** Impactent la surface d'échange disponible pour l'adsorption.

## II.4 Les tamis moléculaires : (voir l'annexe B)

Les tamis moléculaires sont des matériaux cristallins poreux qui peuvent être utilisés pour adsorber et séparer des molécules en fonction de leur taille. Ils sont constitués d'aluminosilicates de métaux hydratés, qui ont une structure tridimensionnelle unique avec des cavités et des pores de taille uniforme.



Figure II.8 : Tamis moléculaire sous ses différentes formes

Les pores des tamis moléculaires sont si petits qu'ils ne peuvent adsorber que des molécules d'une taille spécifique. Cela permet d'utiliser les tamis moléculaires pour séparer des mélanges de gaz et de liquides, par exemple pour éliminer l'eau du gaz naturel ou pour purifier. Les tamis moléculaires sont utilisés dans une variété d'applications, notamment :

**Déshydratation** : Les tamis moléculaires peuvent être utilisés pour éliminer l'eau des gaz et des liquides. Ceci est utile pour une variété d'applications, telles que la conservation des aliments, la prévention de la corrosion et la préparation de produits pharmaceutiques.

**Séparation des gaz** : Les tamis moléculaires peuvent être utilisés pour séparer les gaz les uns des autres. Ceci est utile pour une variété d'applications, telles que la production d'oxygène, la purification du gaz naturel et le traitement des gaz d'échappement.

**Catalyse** : Les tamis moléculaires peuvent être utilisés comme catalyseurs pour des réactions chimiques. Ceci est utile pour une variété d'applications, telles que la production de produits chimiques fins, le raffinage du pétrole et la fabrication de produits pharmaceutiques.

#### II.4.1 Description :

Le tamis moléculaire UOP TYPE AG-DG est un adsorbant à base d'alumino-silicate, il adsorbe les molécules avec un diamètre critique jusqu'à 4 Angstrom.

**Tableau II.2** : Fiche technique du tamis moléculaire [3] et [1].

Propriétés	Caractéristiques	
Diamètre nominale des pores	4	°A
Diamètre des particules	1.6	Mm
Densité tassée	700	kg/m <sup>3</sup>
Chaleur de désorption de l'eau	1800	kcal/kg d'eau
Teneur en eau résiduelle	2	%
Capacité en eau à l'équilibre	21	%
Capacité calorifique	0.22	kcal/kg°C

#### II.4.2 Formule chimique :

Formules chimiques de tamis moléculaires courants :

- **Zéolithe A**: Na<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>·2H<sub>2</sub>O
- **Zéolithe X**: Na<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>·6H<sub>2</sub>O

- **Zéolithe Y:**  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  (où x peut varier de 2 à 6)
- **Aluminosilicate:**  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (où n peut varier)
- **Charbon actif:** C (carbone)
- **Gel de silice:**  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (où n peut varier)

### II.4.3 Régénération :

Tamis moléculaire peut être régénéré après utilisation, ce qui permet de l'utiliser plusieurs fois. La méthode de régénération dépend du type de tamis moléculaire et de l'application pour laquelle il a été utilisé. [6]

Voici les méthodes de régénération les plus courantes :

**\*Chauffage:** La méthode la plus simple et la plus courante consiste à chauffer le tamis moléculaire à une température élevée (généralement entre 200 et 300 °C) sous vide ou dans un gaz inerte. Cela permet d'éliminer les molécules d'eau et autres contaminants adsorbés sur la surface du tamis.

**\*Purge à gaz:** Le tamis moléculaire peut être régénéré en le purgeant avec un gaz sec, tel que l'azote ou l'hélium. Ce gaz permet de désorber les molécules d'eau et autres contaminants adsorbés sur la surface du tamis.

**\*Lavage chimique:** Dans certains cas, le tamis moléculaire peut être régénéré par lavage avec une solution chimique. Cette méthode est généralement utilisée pour les tamis moléculaires qui ont été contaminés par des produits chimiques spécifiques.

### II.4.4 Paramètres de fonctionnement :

Les principaux paramètres de fonctionnement du tamis moléculaire sont les suivants :

**\*Température:** La température de fonctionnement du tamis moléculaire est généralement limitée à une plage spécifique. La température maximale de fonctionnement dépend du type de tamis moléculaire et de sa composition chimique.

**\*Pression:** La pression de fonctionnement du tamis moléculaire peut également affecter ses performances. La pression maximale de fonctionnement dépend du type de tamis moléculaire et de sa structure poreuse.

**\*Débit:** Le débit du fluide à travers le tamis moléculaire peut affecter son efficacité. Un débit trop élevé peut entraîner une diminution de l'efficacité de la séparation.

**Tableau II.3 :** Les paramètres de fonctionnement

<b>DEBIT DE CHARGE GPL</b>	<b>195000kg/hr</b>
DIRECTION DE L'ÉCOULEMENT GPL	Vers le bas à travers couches
PRESSION DE DESIGN	39kg/cm <sup>2</sup> (555psia)
PRESSION DE SERVICE	24kg/cm <sup>2</sup> (341psia)
TEMPERATURE DE SERVICE	280°C
TEMPERATURE DE DESIGN	A déterminer

#### II.4.5 Les diamètres critiques pour chaque molécule :

Le diamètre critique d'une molécule est le diamètre minimum d'un pore dans lequel la molécule peut passer. Il est important de connaître le diamètre critique d'une molécule pour choisir le tamis moléculaire approprié pour une application donnée. [7]

Tableau II.4: Diamètres de certaines molécules [7]

Molécule	Diamètre critique (Å°)
Hydrogène	2,4
Acétylène	2,4
Oxygène	2,8
Monoxyde de carbone	2,8
Dioxyde de carbone	2,8
Azote	3,0
Eau	2,8
Ammoniac	3,6
Sulfure d'hydrogène	3,6
Méthane	4,0
Ethylène	4,2
Ethane	4,4
Méthanol	4,4
Ethanol	4,4
Mercaptan méthylique	4,5
Propane	4,9
Propylène	5,0
Mercaptan éthylique	5,1
Butène	5,1
1,3-Butadiène	5,2
Chlorodifluorométhane (R-22)	5,3
Thiophène	5,3
i-Butane à 1-C22 H46	5,6
Dichlorodifluorométhane	5,7
Cyclohexane	6,1
Benzène	6,7
Toluène	6,7
P-Xylène	6,7
M-Xylène	7,1
O-Xylène	7,4
Triéthylamine	8,4

## Présentation de problème :

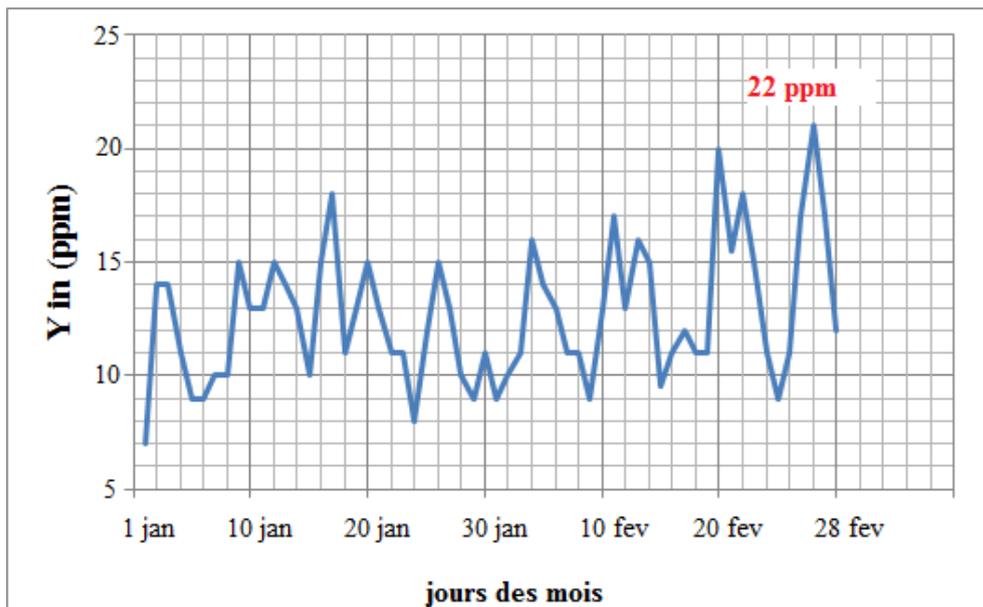
La problématique soumise à notre recherche était d'évaluer les performances du sécheur ,en recherchant l'optimisation du tamis moléculaire, notamment le temps de passage du GPL selon les différentes étapes opératoires, sans négliger la charge massique du gaz et sa concentration en eau .

Il est à noter que la section de déshydratation de la charge du complexe GP1/Z et conçue pour une teneur en eau dissoute dans la charge GPL égale à 100ppm, et que le temps d'adsorption et de régénération est fixé à 24 heures

A l'heure actuelle nous constatons que ce niveau est loin d'être atteint, ceci est dû à l'amélioration de la qualité de la charge de 25ppm en provenance du sud et l'efficacité de son temps de traitement par tamis moléculaire mérite d'être revue.

Ce problème a été confirmé en traçant la courbe durant deux mois, et le problème persiste et il est permanent et ceci à de considérables pertes économiques vu que le lit d'adsorption travaille bien au-dessous de sa capacité.

Les résultats trouvés sont représenté sur le graphe ci-dessous figureII.9



**FigureII.9** La variation de la teneur en eau durant les mois (janvier et février 2024)

### Interprétation de graphe :

D'après les analyses qu'on a effectuées au niveau de laboratoire de la teneur en eau dans la charge GPL à l'entrée du sécheur pour un durée de deux mois « figure 4 », on a constaté que la concentration de la charge en eau ne dépasse pas la 22 ppm qui est une teneur très loin des normes exigées, soit le  $\frac{1}{4}$  de la valeur de design (100 ppm).

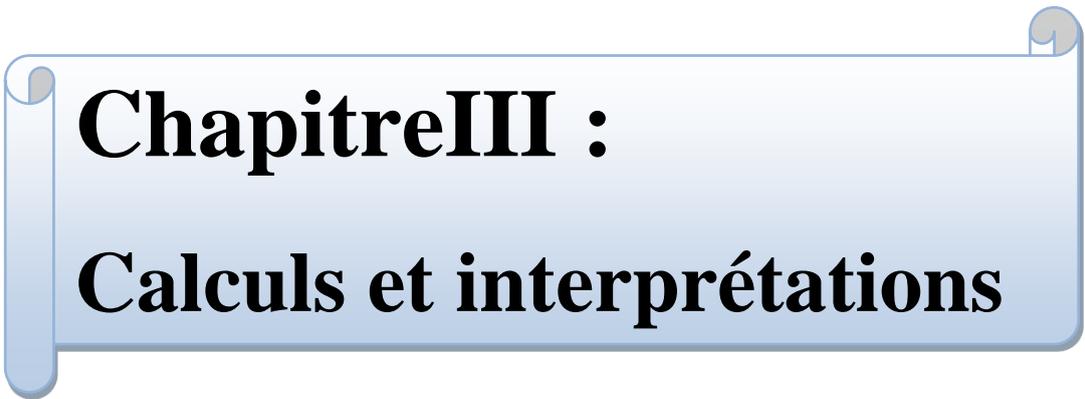
Dans le but d'optimiser le fonctionnement de la section de déshydratation de charge, l'objet de notre travail consiste à effectuer une étude en prenant en considération les différentes concentrations en eau.

C'est pourquoi on a commencé par la recherche des solutions possibles à notre problème cette recherche nous permet d'étudier les deux solutions qui sont les suivantes:

- la prolongation du temps d'adsorption.
- la réduction du temps de régénération.

En se basant sur le dimensionnement du déshydrateur de charge et calcul du bilan massique et énergétique.

On choisit la solution qui nous permet le plus d'économiser de l'énergie et de préserve la durée de vie du desséchant sans perturber la capacité de production et la qualité du produit final.



**Chapitre III :**

**Calculs et interprétations**

Le but de cette partie de travail est d'optimiser le fonctionnement de la section déshydratation de charge, en déterminant le temps d'adsorption nécessaire pour faire fonctionner l'adsorbeur jusqu'à son point de saturation, en fonction de la teneur d'eau dans la charge ; tout en essayant d'optimiser les paramètres de fonctionnement du cycle de chauffage.

Pour cela, la partie calcul comprend :

- Un bilan thermique.
- Un bilan de matière.

Les bilans thermiques et matière sont les parties essentielles de notre travail, où on va évaluer la quantité de chaleur et le débit de GN nécessaires à la régénération du sécheur.

Avant toute application, nous nous assurons de la fiabilité de la méthode adoptée par la suite dans un sous-titre « Validation de méthode » où les calculs seront faits pour un déshydrateur de charge fonctionnant selon le design.

### III.1 Constitution d'un déshydrateur de charge : [8], [9]

La partie essentielle d'une colonne de déshydratation est le tamis moléculaire qui est l'agent adsorbant. Et une couche de billes en céramique (alumine) de 150 mm d'épaisseur avec une couche similaire au-dessus qui présentent un support.

En général des treillis métalliques, des grilles et des tiges sont utilisés pour supporter le tamis moléculaire.

La fiche technique du tamis moléculaire et représenté sur le Tableau III.1:

**Tableau III.1:** La fiche technique du tamis moléculaire. [6]

Diamètre nominal des pores	4°A
Diamètre des particules	3.2 mm
Densité tassée	640kg/m <sup>3</sup>
Chaleur de desorption de l'eau	1800BTU/Lb d'eau
Teneur en eau résiduelle	2%
Capacité en eau à l'équilibre	22%
Capacité calorifique	0.22 kcal / kg °C

### III.2 Les conditions opératoires d'adsorption / désorption: [8]

- Durée d'adsorption: 36 heures.
- Durée de régénération: 19 heures.

Réchauffage = 11 heures.

Refroidissement = 5 heures.

### III.3 Température d'entrée du gaz de régénération:[8]

Réchauffage T = 280°C.

Refroidissement T= 12.7°C.

### III.4 La théorie de calcul:

#### III.4.1 Bilan énergétique:

##### III.4.1.1 Calcul de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération:

La quantité de chaleur nécessaire à la régénération est:

$$Q_{total} = Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des} + Q_{pertes} \dots \dots \dots (III - 1)$$

$Q_{\text{tamis}}$ : La chaleur nécessaire au réchauffage du tamis de la température d'adsorption à la température de désorption (BTU).

$Q_{\text{acier}}$ : La chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier de la température d'adsorption à la température de désorption (BTU).

$Q_{\text{des}}$ : La chaleur nécessaire à la désorption de l'eau fixée sur le tamis (BTU).

$Q_{\text{pertes}}$ : Considérées comme étant égales à 10% de la somme

$$(Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}} + Q_{\text{des}}) \text{ (BTU)}.$$

#### III.4.1.2 Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption de l'eau $Q_{\text{des}}$ :

On calcul la chaleur de désorption de l'eau par la formule suivante:

$$Q_{\text{des}} = M_{\text{ads}} * \Delta H \dots \dots \dots \text{ (III- 2)}$$

$\Delta H$  : La chaleur spécifique de désorption de l'eau (BTU/ Lb).

#### III.4.1.3 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis $Q_{\text{tamis}}$ :

$$Q_{\text{tamis}} = m_t * Cp_t * (T - T_{\text{ads}}) \dots \dots \dots \text{ (III - 3)}$$

$m_t$ : La masse totale du tamis moléculaire (Lb).

$Cp_t$ : La capacité calorifique du tamis (BTU/ Lb. °F).

$T$  : La température moyenne du lit en fin de réchauffage (°F).

$T_{\text{ads}}$ : La température d'adsorption (°F).

#### III.4.1.4 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier $Q_{\text{acier}}$ :

$$Q_{\text{acier}} = m_c * Cp_c * (T - T_{\text{ads}}) \dots \dots \dots \text{ (III - 4)}$$

$m_c$ : La masse totale de l'acier (Lb)

$Cp_c$ : La capacité calorifique de l'acier (BTU / lb. °F).

#### III.4.1.5 Calcul des pertes de chaleur $Q_{\text{perte}}$ :

$$Q_{\text{pertes}} = 0,1 * (Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}} + Q_{\text{des}}) \dots \dots \dots \text{ (III-5)}$$

Pour pouvoir calculer les besoins en chaleur ( $Q_{\text{totale}}$ ), nous avons besoin de la Température du lit en fin de chauffage « T » :

#### ❖ Calcul de la température du lit « T »: [10]

On peut l'obtenir par la relation suivante :

$$T = T_S - \frac{T_e - T_S}{2} \dots \dots \dots \text{ (III - 6)}$$

**Te:** La température d'entrée du gaz de régénération (°F).

**Ts:** La température de sortie du gaz de régénération (°F).

#### III.4.1.6 Calcul de la chaleur $H_f$ fournie par le four: [11]

$$H_f = \frac{Q_{totale}}{\frac{1}{\varepsilon}} \dots \dots \dots (III- 7)$$

$\frac{1}{\varepsilon}$ : L'efficacité thermique de four.

#### III.4.1.7 Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr »: [10]

$$tr = \frac{H_f}{\Delta H(T_i - T_e) \times M_g} \dots \dots \dots (III- 8)$$

$M_g$ : Le débit du gaz de chauffage (Nm<sup>3</sup> / hr).

$\Delta H_{(T_i - T_{ads})}$ : La différence de l'enthalpie du gaz (BTU / Nm<sup>3</sup>).

$T_r$ : Le temps de chauffage (hr).

#### III.4.1.8 calcul de la chaleur fournie par le four par cycle « $H_f$ /cycle»:

$$H_{f/cycle} = \frac{3xH_f xtr}{C_{cycle}}$$

$$C_{cycle} = 3 * t_{ads}$$

$$H_{f/cycle} = \frac{H_f xtr}{t_{ads}} \dots \dots \dots (III- 9)$$

$H_{f/cycle}$ : la chaleur fournie par le four par cycle

(BTU/hr).  $T_{ads}$ : le temps d'adsorption (hr).

#### III.4.1.9 Calcul du temps de refroidissement du tamis « tref » :

$$t_{ref} = \frac{Q_{tamis} + Q_{acier}}{Q_{totale}} xtr \dots \dots \dots (III- 10)$$

#### III.4.1.10 Calcul de la chaleur soutirée au système $Q_{ref}$ :

$$Q_{ref} = \frac{Q_{tamis} + Q_{acier}}{Q_{ref}} \dots \dots \dots (III- 11)$$

### III.5.1 Le bilan de matière de la régénération : [10]

#### ❖ Calcul du débit du gaz de refroidissement :

Le débit du gaz de refroidissement est calculé comme suit:

$$M_{ref} = \frac{Q_{ref}}{\Delta H(T_s - T_e)} \dots \dots \dots (III- 12)$$

$\Delta H (T_s - T_e)$ : La différence de l'enthalpie du gaz (BTU / Nm<sup>3</sup>) de refroidissement.



**Tableau III.2:** La composition de la charge du GPL

COMPOSANT	Mi g/mole	Yi (%molaire)	Yi * Mi
<b>C1</b>	16,043	0, 24	0,04
<b>C2</b>	30,070	1, 92	0,58
<b>C3</b>	44,097	59, 37	26,18
<b>i-C4</b>	58,123	13, 68	7,95
<b>n-C4</b>	58,123	24, 54	14,26
<b>n-C5</b>	72,150	0, 20	0,14
<b>n-C5</b>	72,150	0, 05	0,04

Poids moléculaire du GPL:  $M_{GPL} = \sum Y_i * M_i$

$M_{GPL} = 49.2 \text{ Kg /Kmole.}$

- ✓ Solubilité de l'eau dans le GPL à  $T=25^\circ\text{C}$ :  $SOL=380\text{ppm mole}$  (voir annexe 2)
- ✓ Teneur en eau à l'entrée du sécheur:  $X_E = 100 \text{ ppm.}$
- ✓ Teneur en eau à la sortie du sécheur:  $X_s = 1 \text{ ppm.}$
- ✓ Phase: liquide.
- ✓ Masse volumique du GPL :  $\rho_{GPL} = 530 \text{ Kg / m}^3 = 33.09 \text{ Lb / ft}^3$

### III.6.1 Dimensionnement d'un déshydrateur: [10]

#### III.6.1.1 Calcul de la quantité d'eau adsorbée :

##### ❖ Diamètre minimum du lit :

Pour le calcul du diamètre minimum du lit, on utilise la formule suivante :

$$D_{min} = \sqrt{\frac{4 * \rho_{GPL} * Q}{\pi * G}} \dots \dots \dots \text{(III- 15)}$$

$D_{min}$  : Diamètre minimum du lit de tamis ( ft ).

$\rho_{GPL}$  : Masse volumique de la charge (Lb / ft<sup>3</sup>).

$Q$  : Débit volumique de la charge (ft<sup>3</sup> / hr).

$G$  : Vitesse massique de l'écoulement de fluide (Lb / ft<sup>2</sup> .hr).

Pour les tamis moléculaires, la vitesse massique de l'écoulement est donnée par la formule suivante:

$$G = 3600 \sqrt{C * \rho_{tamis} * \rho_{GPL} * D_p} \dots \dots \dots \text{(III- 16)}$$

$D_p$ : Diamètre moyen des particules du tamis (ft).

$\rho_{tamis}$ : Masse volumique du dessicant (Lb/ ft<sup>3</sup>)

C : Constante relative aux tamis moléculaire ( $C = g \cdot 0,03291925 = 1.06 \text{ ft} / \text{sec}^2$ )

❖ **Application Numérique :**

$$G = 3600 \cdot \sqrt{C \cdot \rho_{\text{tamis}} \cdot \rho_{\text{GPL}} \cdot DP}$$

A N:  $D_p = 0,01 \text{ ft}$ .

$$\rho_{\text{tamis}} = 640 \text{ kg} / \text{m}^3 = 39,95 \text{ Lb} / \text{ft}^3.$$

$$\rho_{\text{GPL}} = 530 \text{ kg} / \text{m}^3 = 33,09 \text{ Lb} / \text{ft}^3.$$

$$g = 32.2 \text{ ft} / \text{sec}^2 \quad C = 1.06$$

$$G = 3600 \sqrt{1.06 \cdot 39.95 \cdot 33.09 \cdot 0.01}$$

$$\boxed{G = 13820 \text{ (Lb} / \text{ft}^2 \cdot \text{hr)}}$$

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot \rho_{\text{GPL}} \cdot Q}{\pi \cdot G}} =$$

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 33,09 \cdot 8675,09}{3,14 \cdot 13476,03}}$$

$$\boxed{D_{\min} = 5.14 \text{ ft}}$$

❖ **La hauteur totale du lit: [10]**

La hauteur totale du lit est donnée par 1 'équation suivante:

Avec:

$$H_t = H_s + H_z \dots \dots \dots \text{(III-17)}$$

$H_s$  : la hauteur de la zone d'équilibre (ft).

$H_z$  : la longueur de la zone de transfert de masse (ft).

❖ **Calcul de la vitesse actuelle d'écoulement de fluide ( $U_{act}$ ): [10]**

$$U_{act} = \frac{Q}{S} \dots \dots \dots \text{(III - 18)}$$

Avec :

$$S = \frac{\pi \cdot D_{\min}^2}{4}$$

AN:

$$S = \frac{3,14 \cdot 5,2^2}{4}$$

$$\boxed{S = 20.74 \text{ ft}^2}$$

$$U_{act} = \frac{8652.1}{20.74}$$

$$\boxed{U_{act} = 417.16 \text{ (ft} / \text{hr) = 6,96 (ft)}}$$

❖ **Calcul le débit d'eau:**

$$q_w = \frac{4 \cdot Y_{in} \cdot Q \cdot \rho_{\text{GPL}}}{\pi \cdot D_L^2} \dots \dots \dots \text{(III- 19)}$$

DL: le diamètre du lit. (DL=2, 1 m= 6,89 ft ).

$$q_w = 0.8 \text{ ( Lb/ft}^2 \text{ .hr).}$$

❖ **Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse:**

$$H_z = \frac{A * q_w^{0.7895}}{U_{act}^{0.5506} * R_s^{0.2646}} \dots \dots \dots \text{ (III- 20)}$$

$$H_z = 19.16 \text{ inch} = 1.59$$

A : Constante pour les tamis moléculaires [A=225].

q<sub>w</sub>: quantité d'eau dans le gaz par unité de surface du déshydrateur [lb/hr.ft<sup>2</sup>]

R<sub>s</sub>: Saturation relative du gaz d'entrée en % [100% pour notre cas].

U<sub>act</sub>: vitesse superficielle du gaz [ft/mn].

❖ **Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre:**

$$H_s = H_t - H_z \dots \dots \dots \text{ (IV - 21)}$$

$$H_s = 4.31 \text{ ft} = 1.32 \text{ m}$$

H<sub>t</sub>: la hauteur total du lit (H t =1.8 m = 5.9 ft).

H<sub>z</sub>: la hauteur de la zone de transfert de masse.

❖ **Estimation de la capacité d'adsorption à l'équilibre: [10]**

La capacité d'adsorption est de 22 Lb d'eau / Lb de tamis moléculaire qui représente la saturation complète du tamis moléculaire.

$$X_s = (22 - X_1)$$

X<sub>1</sub> : la teneur en eau résiduelle, X<sub>1</sub> = 1.5 % en poids.

A cause des pertes de la capacité lors de l'adsorption engendrée par l'encrassement des pores ; de la destruction des cristaux ; de l'attaque chimique .....Etc. il est convenable d'ajouter une quantité de tamis pour compenser l'effet de vieillissement.

Si l'on considère une perte de 5% par an de la capacité d'adsorption avec une durée de vie du tamis égale à trois ans, les pertes seront calculées ainsi:

Coefficient d'usure = 70 %

La capacité sera en fin de compte égale à:

$$X_s = (22 - X_1) * 0.7$$

Alors:

$$X_s = 14.35 \text{ Lb d'eau / 100 Lb adsorbant}$$

❖ Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X):

$$X = X_S * (1 - \frac{C * H_z}{H_s}) \dots \dots \dots (III- 22)$$

**X = 11.92 Lb d'eau / 100 Lb de dessicant**

C: une constante empirique qu'on prend généralement égale à 0.45 et qui dépend de la forme des particules de tamis moléculaire.

❖ Estimation de la quantité d'eau adsorbée M ads:

$$M_{ads} = \frac{(H_t - (C * H_z)) * (X_S * f_{tamis})}{127.38} \dots \dots \dots (III- 23)$$

**M<sub>ads</sub> = 1.1010<sup>3</sup>Lb**

❖ Calcul du temps d'adsorption:

$$t_{ads} = \frac{0.01 * H_t * X * f_{tamis}}{q_w}$$

**t<sub>ads</sub> = 36,80 h**

❖ Détermination de l'efficacité d'adsorption:

$$EFF = \frac{X}{X_S}$$

**EFF = 77.6 %**

III.6.2.1 Calcul du bilan thermique : [10]

❖ Propriété du gaz de régénération : [12]

❖ La composition du gaz de régénération :

Tableau III.3: La composition du gaz de régénération.

Corposant	Xien mole	Tref(k)	Trec(k)	ΔH° (KJ/Kg)	Mi (Kg/Kmole)	xi %en poids	ΔH° *Xi
C1	0,8386	285,85	553,15	698,30	16	0,72	500,69
C2	0,0743	285,85	553,15	599,60	30	0,12	71,42
C3	0,0186	285,85	553,15	586,64	44	0,04	25,66
i-C4	0,0026	285,85	553,15	591,34	58	0,01	4,77
n-C4	0,0008	285,85	553,15	592,58	58	0,00	1,47
i-C5	0,004	285,85	553,15	585,59	72	0,02	9,01
n-C5	0,0009	285,85	553,15	586,78	72	0,00	2,03
C6	0,0003	285,85	553,15	589,15	86	0,00	0,81
N2	0,0557	285,85	553,15	280,49	28	0,08	23,38
CO2	0,0024	285,85	553,15	253,63	44	0,01	1,43
He	0,0018	285,85	553,15	0,00	4	0,00	0,00
	1				18,71	1,00	640,66

Poids moléculaire du GN:  $M_{GN} = \sum Y_i * M_i$ .

$$M_{GN} = 18.71 \text{ Kg / Kmole}$$

❖ **Le gaz naturel de Réchauffage:**  $T = 280^\circ$   $C = 253k$   $P = 4.5 \text{ kg / cm}^2$

❖ **Le gaz naturel de Refroidissement:**  $T = 12.7^\circ$   $C = 285,85k$   $P = 4.5 \text{ kg / cm}^2$

❖ **Calcul de la masse volumique du GN dans les conditions normal  $\rho$ :**

$$\rho_{GN} = \frac{P * M_{GN}}{Z * R * T}$$

$Z = 1$ .

$M_{GN} = 18.71 \text{ Kg / K mole}$ .

$$\rho_{GN} = 0.83 \text{ Kg / Nm}^3$$

$T = 0^\circ \text{C} = 273.15^\circ \text{K}$ .

$P = 1.01351 \text{ kg / cm}^2 = 1 \text{ atm}$ .

$R = 0.0821 \text{ (l. atm / mole. }^\circ\text{K)}$

❖ **Calcul de l'enthalpie de chauffage du gaz de  $12.7^\circ\text{C}$  à  $280^\circ\text{C}$  [11]**

$$\Delta H = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5$$

$$T = T_{\text{rech}} - T_{\text{ref}}$$

$$\Delta H = A + B (T_{\text{rech}} - T_{\text{ref}}) + C (T_{\text{rech}} - T_{\text{ref}})^2 + D (T_{\text{rech}} - T_{\text{ref}})^3 + E (T_{\text{rech}} - T_{\text{ref}})^4 + F (T_{\text{rech}} - T_{\text{ref}})^5$$

$\Delta H$ : l'enthalpie qui fournit par le four exprimée en (Kj / Kg), Tableau (1).

$T$ : le gradient de la température de chauffage du gaz de GN en ( $^\circ\text{K}$ ).

A, B, C, D, E, F : Constantes des compositions de GN de la corrélation (voir l'annexe C)

$$\Delta H = 640,66 \text{ Ki / Kg} = 2,75 \cdot 10^2 \text{ BTU / Lb}$$

❖ **Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q tamis**

❖ **Calcul de la masse du tamis  $m_t$**

$$m_t = \frac{\pi * D_L^2 * H_t * f_{\text{tamis}}}{4}$$

$$m_t = 10257,56 \text{ Lb} = 4652,75 \text{ Kg}$$

$D_L = 2,1 \text{ m} = 6,89 \text{ ft}$ .

$H_t = 2,1 \text{ m} = 6,89 \text{ ft}$ .

$\rho_{\text{tamis}} = 640 \text{ kg/m}^3 = 39,95 \text{ Lb/ft}^3$ .

## ❖ Calcul de la température moyenne du lit en fin de chauffage : [10]

$$T_s = 227 \text{ °C} = 440.6 \text{ °F} = 500 \text{ °K}$$

$$T_e = 280 \text{ °C} = 536 \text{ °F} = 553 \text{ °K}$$

D'après l'équation (III-6) :

$$T = T_s + \frac{T_e - T_s}{2}$$

$$T = 200,5 \text{ °C} = 487,9 \text{ °F} = 473.5$$

$$C_{p_t} = 0.22 \text{ BTU/Lb °f}$$

$$m_t = 10257,56 \text{ Lb}$$

$$T = 253.5 \text{ °C} = 487.9 \text{ °F} = 526 \text{ °K}$$

$$T_{ads} = 25 \text{ °C} = 77 \text{ °F}$$

D'après l'équation (III-3):

$$Q_{tamis} = m_t * C_{p_t} * (T - T_{ads})$$

$$Q_{tamis} = 7,14 \cdot 10^5 \text{ BTU}$$

## ❖ Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage de l'acier:

❖ Calcul du volume de l'acier ( $V_c$ ): [10]

$$V_c = (S_{ext} - S_{int}) * L$$

Avec:

$V_c$ : Le volume total de l'acier (ft)

$S_{ex}$ : La surface externe de la paroi du sécheur (ft<sup>2</sup>).  
 $S_{int}$ : La surface interne de la paroi du sécheur (ft<sup>2</sup>)  
 $L$ : La hauteur de la colonne (ft).

$$V_c = \frac{\pi * [(d + (2 * E_p))^2 - d^2] * L}{4}$$

$$V_c = \pi * L * [E_p * (d + E_p)]$$

$E_p$ : L'épaisseur de l'acier.  $E_p = 36.8 \text{ mm} = 0,12 \text{ ft}$

$d$ : Le diamètre de l'acier = 6,89 ft = 2.1 m

$L$ : La hauteur de la colonne = 4630 mm = 15,19 ft

$$V_c = 40.39 \text{ ft}^3$$

❖ Calcul de la masse de l'acier  $m$ 

$$m_c = V_c * \rho_{acier}$$

$\rho_{acier}$  : La masse volumique de l'acier (Lb / ft<sup>3</sup>) = 500 Lb / ft<sup>3</sup>

$$V_c = 40,37 \text{ ft}^3$$

$$m_c = 210^4 \text{ Lb}$$

On doit ajouter la quantité d'acier relatif aux supports, aux pipes et aux brides estimées à 35%

Donc :

$$m_c = 2.72 \cdot 10^4 \text{ Lb}$$

$C_{pc}$ : La capacité calorifique de l'acier (BTU / lb. °F) = 0.12 BTU / lb.°F [3]

$$m_c = 2.710^4 \text{ Lb.}$$

D'après l'équation (III-4):  $Q_{acier} = m_c * C_{pc} * (T - T_{ads})$

$$Q_{acier} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

❖ Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption  $Q_{des}$ :

La quantité d'eau adsorbée  $M_{ads} =$

1,11 10<sup>3</sup> Lb. La chaleur de

désorption  $\Delta H = 1800 \text{ BTU/Lb.}$

D'après l'équation (III-2):

$$Q_{des} = M_{ads} * \Delta H$$

$$Q_{des} = 2 \cdot 10^6$$

❖ Calcul des pertes de chaleur  $Q_{perte}$ :

$$Q_{des} = 2 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{acier} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{tamis} = 7,13 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

D'après l'équation (III-5):

$$Q_{pertes} = 0,1 * (Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des})$$

$$Q_{perte} = 3,86 \cdot 10^5$$

❖ Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération  $Q_{totale}$ :

D'après l'équation (III-1):

$$Q_{total} = Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des} + Q_{pertes}$$

$$Q_{totale} = 4,25 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

❖ Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage  $H_f$ : [10]

- Calcul de l'efficacité thermique du four  $1/\epsilon$ : [11]

Efficacité thermique du four pendant le réchauffage:

$$\varepsilon = 2,25 + (0,03113 * T)$$

T : Temps de chauffage (hr).

$$\frac{1}{\varepsilon} = 0,38$$

D'après l'équation (III-7): à partir le tableau (III-1):

$$H_f = \frac{Q_{totale}}{\frac{1}{\varepsilon}}$$

$$1/\varepsilon = 0,38$$

$$Q_{totale} = 4,11 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

$$\mathbf{H_f = 1,10 \cdot 10^7 \text{ BTU}}$$

- Calcul du temps de réchauffage du tamis «  $t_r$  » : [10]
- Les données sont représentées dans le tableau III.4

**Tableau III.4:** Représentation des données de réchauffage du tamis

<b>Quantité de chaleur apportée par le GN: <math>H_f</math> (BTU)</b>	1.08 $10^7$
<b>Déférence de L'enthalpie (<math>\Delta H_{(280-12.7)^\circ\text{C}}</math> : BTU / Nm<sup>3</sup>)</b>	1179,47
<b>Masse volumique <math>\rho_{GN}</math> (Lb/ Nm<sup>3</sup>)</b>	1,8298
<b>Température finale (<math>T_f</math> : °F)</b>	536
<b>Température initiale (<math>T_i</math> : °F)</b>	54,86

Pour  $\Delta H$  en Kj / Nm<sup>3</sup>:  $\Delta H = \Delta H \text{ (Kj/ Kg)} * \rho_{GN} \Delta H = 640,66 \text{ Kj/ Kg}$   
 $\rho_{GN} = 0,83 \text{ Kg/ Nm}^3 = 1,83 \text{ Lb/ Nm}^3$ .

D'après l'équation (III-8):

$$t_r = \frac{H_f}{\Delta H * M_{GN}}$$

$$\mathbf{\Delta H = 504,34 \text{ BTU/ Nm}^3}$$

$$H_f = 1,08 \cdot 10^7 \text{ BTU}$$

$$\Delta H = 504,34 \text{ BTU/ Nm}^3$$

$$M_{GN} = 2000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

$H_f$ : La chaleur fournie par le four pour le GN exprimée en

$$\mathbf{t_r = 10,91 \text{ hr}}$$

$(\text{BTU} / \text{Nm}^3) \cdot M_{\text{GN}}$ : Le débit du GN sortant du four exprimé en  $(\text{Nm}^3/\text{hr})$ .

$\Delta H_{(T_e - T_{\text{ads}})}$ : La différence de l'enthalpie du gaz  $(\text{BTU} / \text{Nm}^3)$

❖ **Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle « $H_f/\text{cycle}$ »:** [10]

$$T_r = 10,91 \text{ hr.}$$

$$H_f = 1,08 \cdot 10^7 \text{ BTU.}$$

$$T_{\text{ads}} = 36,8 \text{ hr.}$$

D'après l'équation (III-9):

$$H_{f/\text{cycle}} = \frac{H_f * t_r}{t_{\text{ads}}}$$

$$H_{f/\text{CYCLE}} = 3,26 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

❖ **Calcul du temps de refroidissement du tamis « $t_{\text{ref}}$ »:**

D'après l'équation (III-10):

$$t_{\text{ref}} = \frac{Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}}}{Q_{\text{totale}}} * t_r$$

$$t_{\text{ref}} = 4,48 \text{ hr}$$

$$Q_{\text{totale}} = 4,11 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7,13 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

❖ **Calcul de la chaleur soutirée au système  $Q_{\text{ref}}$ :**

D'après l'équation (III-11):

$$Q_{\text{tamis}} = 7,13 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

$$t_{\text{ref}} = 4,48 \text{ hr}$$

$$Q_{\text{ref}} = \frac{Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}}}{Q_{\text{ref}}}$$

$$Q_{\text{ref}} = 1,83 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr}$$

\* Calcul du bilan de matière de la régénération : [10]

\* Calcul du débit du gaz de refroidissement :

D'après l'équation (III-12)

$$M_{ref} = \frac{Q_{ref}}{\Delta H(T_s - T_e)}$$

$$M_{ref} = 359.76 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

$$Q_{ref} = 1.83 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr.}$$

$$\Delta H(T_s - T_e) = 507,42 \text{ BTU/ Nm}^3.$$

$$T_s = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 440,6 \text{ }^\circ\text{F} = 500 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_e = 12,7 \text{ }^\circ\text{C} = 54,86 \text{ }^\circ\text{F} = 285,7 \text{ }^\circ\text{K}$$

\* **Calcul des pertes de charge: [10]**

\* Calcul de la perte de charge  $\Delta P/L_1$  pour le GN chaud:

- Le gaz naturel de Réchauffage:

$$T = 280 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P = 3,5 \text{ kg / cm}^2$$

- Calcul de la masse volumique du GN

$$\rho_{GN} = \frac{P \cdot M_{GN}}{Z \cdot R \cdot T}$$

- Calcul du coefficient de compressibilité (Z):

Le facteur de compressibilité est calculé par la formule suivante:

$$Z = 1,046 - (2,034 \cdot 10^{-9}) \cdot P + (4,571 \cdot 10^{-8}) \cdot P^2.$$

$$Z = 1 \text{ Kg / m}^3$$

Avec P est la pression du travail exprimé en Psia

$$Z = 1$$

$$M_{GN} = 8,71 \text{ Kg/K mole. } T = 280 \text{ }^\circ\text{C} = 553 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$\rho_{GN} = 1,41 \text{ Kg/m}^3$$

$$P = 3,5 \text{ kg / cm}^2 = 3,42 \text{ atm.}$$

$$R = 0,082 \text{ L. atm / mole. }^\circ\text{K.}$$

\* Calcul de la vitesse superficielle  $U_1$  à travers le lit: [10]

$$\rho_{GN} = 1,41 \text{ Kg} / \text{Nm}^3 = 0,09 \text{ Lb} / \text{ft}^3.$$

$$M_g = 2000 \text{ Nm}^3 / \text{hr} = 3,68 \text{ 103 Lb} / \text{hr}.$$

$$S = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$S = 5,411 \text{ ft}^2$$

$$U_2 = \frac{M_{GN}}{60 * S * f_{GN}}$$

$$U_1 = 125,94 \text{ ft} / \text{min}$$

\* Calcul de la viscosité du GN chaud  $\mu_1$ :

Connaissant la densité relative dr et la pression de régénération :

$$P = 3.5 \text{ kg} / \text{cm}^2 = 350 \text{ Kpas}$$

$$d_r = M_{GN} / M_{air} = 0,64.$$

$$T = 280 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\mu_1 = 0.02 \text{ Cp} = 0.043 \text{ Lb} / \text{ft} \cdot \text{hr} \text{ (Voir annexe 8).}$$

D'après l'équation (III-13) :

$$\Delta P / L_1 = (A * U_1 * \mu_1) + (B * \rho_{GN} * U_1^2)$$

Avec:

$\Delta P / L$  : Perte de charge par unité de longueur (psi / ft)

$\mu$  : Viscosité du GN (Cp)

A, B : Constantes relatives aux dimensions des particules du tamis.

$$\Delta P / L_1 = 0,42 \text{ psi} / \text{ft}$$

$$A = 0,0561 \quad B = 0,0000889$$

**Calcul de  $Re_1$ :**

$$D_p = 0,01 \text{ ft}.$$

$$\mu_1 = 0,02$$

$$C_p = 0,04 \text{ Lb} / \text{ft} \cdot \text{hr}$$

$$G = M_g / S = 680,37 \text{ Lb} / \text{ft}^2 \cdot \text{hr}$$

D'après l'équation (III-14)

$$Re = \frac{G * D_p}{\mu}$$

$$Re_1 = 170,09$$

❖ Calcul de la perte de charge  $\Delta P / L_2$  pour le GN froid: [10]

❖ Calcul du coefficient de compressibilité (Z) : [11], [12]

$$Z = f(T_r, P_r)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

$T_c, P_c$  : paramètres pseudo critiques.

$T_r, P_r$  : température et pression réduites.

$$T_c = \sum Y_i \cdot T_{ci}$$

$$T_c = 194,3^\circ\text{K}.$$

$$P_c = \sum y_i \cdot P_{ci}$$

$$P_c = 45,12 \text{ atm}$$

$$Z = f(T_r = 1,47 ; P_r = 0,1).$$

Et selon l'annexe (D et E) .

$$\mathbf{Z = 0,91 \text{ Kg m}^3}$$

$$\rho_{GN} = \frac{P \cdot M_{GN}}{Z \cdot R \cdot T}$$

$$Z = 0,91$$

$$M_{GN} = 18,71 \text{ Kg / K mole.}$$

$$T = 12,7^\circ\text{C} = 285,7^\circ\text{K}.$$

$$P = 3,5 \text{ kg / cm}^2 = 3,42 \text{ atm.}$$

$$R = 0,082 \text{ (l. atm / mole. K).}$$

$$\mathbf{\rho_{GN} = 3 \text{ Kg / m}^3}$$

❖ **Calcul de la vitesse superficielle  $U_2$  à travers le lit: [10]**

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$S = 5,411 \text{ ft}^2$$

$$\rho_{GN} = 3,88 \text{ Kg / m}^3 = 0,24 \text{ Lb / ft}^3.$$

$$M_g = M_{ref} = 760 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Lb / hr}$$

$$U_2 = \frac{M_{GN}}{60 \cdot S \cdot \rho_{GN}}$$

$$\mathbf{U_2 = 17,96 \text{ ft / min}}$$

❖ **Calcul de la viscosité du GN froid  $\mu_2$ : [10]**

\* **Calcul de la densité relative  $d_r$ :**

$$d_r = \frac{M_{GN}}{M_{air}}$$

$$T = 12,7^\circ\text{C}$$

$$d_r = 0,64$$

$$P = 3,5 \text{ kg / cm}^2 = 350 \text{ Kpas}$$

$\mu_2 = 0.01 \text{ Cp} = 0.03 \text{ Lb /ft .hr.}$  (Voir annexe F).

D'après l'équation (III-13)

$$\Delta P / L_2 = (A * U_2 * \mu_2) + (B_2 * M_{GN} * U^2)$$

$$\Delta P / L_2 = 0.049 \text{ psi / ft}$$

**Calcul de  $Re_2$ : [13]**

$D_p = 0,01 \text{ ft.}$  (Voir annexe B).

$\mu_2 = 0,03 \text{ Lb/ft.hr.}$

$G = Mg/S = 258,73 \text{ lb/ ft}^2 \cdot \text{hr}$

D'après l'équation (III-14) :

$$Re = \frac{G * D_p}{\mu}$$

$$Re_2 = 86.24$$

### III.6.2.3 Récapitulation des résultats :

Les résultats sont représentés sur le tableau III.5

**Tableau III.5:** Représentation des valeurs de design et des valeurs calculées

Les valeurs calculées	Les valeurs de design
mt=4652,75 kg	mt=4653kg
Ht=2,1m	Ht=2,1m
Hf=3.26*10 <sup>6</sup> Kcal /hr	0,15*10 <sup>6</sup> <Hf<3,3*10 <sup>6</sup> Kcal/hr
tr=10,91hr	tr=11 hr
tref=4,48hr	tref=5hr
Mg=2000Nm <sup>3</sup> /hr Mref=760Nm <sup>3</sup> /hr	1000<Débit< 2500 Nm <sup>3</sup> /hr
$\Delta P_1/L=0,42 \text{ psi /ft}$ $\Delta P_2/L=0,049 \text{ psi /ft}$	0,01< $\Delta P/L$ < 0,25 psi/ft
Re1=170,09	Re>100
tads =36,80hr	tads=36hr

Suite à la mise en œuvre de la méthode de calcul établie, il apparaît clairement que cette dernière est valable et justifiée, compte tenu des résultats obtenus.

En effet la perte de charge se trouve dans l'intervalle recommandé où on peut effectuer l'opération de régénération sans soulever le lit, ainsi que la quantité de chaleur fournie par le four. Le régime d'écoulement est turbulent, donc il favorise un bon transfert de masse et une meilleure distribution du gaz à travers le sécheur.

Les marges du design citées étant respectées nous pouvons désormais passer à l'application de notre méthode de calcul dans le cas où la teneur en eau dans la charge est de l'ordre de 25 ppm qui est notre première solution à étudier.

### III.7 Etude de la première solution :

En vue d'optimiser le temps d'adsorption, on procède au calcul du temps pour 25 ppm.

#### III.7.1 Calcul le débit d'eau:

$$q_w = \frac{4 * Y_{in} * Q * \rho_{GPL}}{\pi * D_L}$$

$D_L$ : le diamètre du lit. ( $D_L = 2.1 \text{ m} = 6.89 \text{ ft}$ ) (Voir l'annexe B).

$Y_{in}$ : La teneur en eau dans la charge à l'entrée du déshydrateur exprimée en ppm massique

$\rho_{GPL}$ : Masse volumique de la charge ( $\text{Lb/ ft}^3$ )

$Q$  : Débit volumique de la charge ( $\text{ft}^3 / \text{hr}$ ).

$Y_{in} = 25 \text{ ppm}$

$$q_w = 0,2$$

Un débit d'eau faible par rapport au débit d'eau calculé précédemment à cause de la chute de la teneur d'eau dans la charge.

#### III. 7.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse:

$$H_z = \frac{225 * q_w^{0.7895}}{U_{act}^{0.5506} * R_s^{0.2646}}$$

$$q_w = \frac{4 * Y_{in} * Q * \rho_{GPL}}{\pi * D_L}$$

$q_w$ : le débit d'eau en  $\text{Lb/ ft}^2 \cdot \text{hr}$ .

$U_{act}$ : la vitesse actuelle d'écoulement de fluide.

$R_s$ : la teneur en eau dans la charge de GPL,  $R_s = 25 \%$

$$H_z = 9,26 \text{ inch} = 0,76 \text{ ft} = 0,23$$

Un débit d'eau faible par rapport au débit d'eau calculé précédemment à cause de la chute de la teneur d'eau dans la charge.

#### III.7.3 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre:

$$H_s = H_t - H_z$$

$H_s$  : la hauteur de la zone d'équilibre (ft).

$H_z$  : la longueur de la zone de transfert de masse (ft).

$H_t$  : la hauteur total du lit ( $H_t = 1,8 \text{ m} = 5,9 \text{ ft}$ ) (voir l'annexe B).

$$H_s = 5,14 \text{ ft} = 1,56$$

Contrairement à la zone de transfert, la zone d'équilibre augmente puisque nous avons gardé la même hauteur de lit.

### III.7.4 Estimation de la quantité d'eau adsorbée $M_{ads}$ : [10]

$$M_{ads} = \frac{(H_s - (C * H_z)) * X_s * D_L^2 * f_{tamis}}{127.38}$$

$$M_{ads} = 1571,58 \text{ Lb}$$

$X_s$ : la capacité d'adsorption à l'équilibre neuf à 25°C,  $X_s = 22$  % en poids (voir l'annexe B).

$\rho_{tamis}$ : Masse volumique du tamis.

$C$ : Constante relative aux tamis moléculaire.

C'est une quantité d'eau qui devrait être adsorbé par le sécheur mais puisque la section de déshydratation est assez ancienne elle n'a pas la même capacité d'adsorption qui nous oblige d'utiliser un Coefficient de correction  $C=0.45$ .

### III.7.5 Calcul du temps d'adsorption:

$$t_{ads} = \frac{M_{ads}}{Y_{in} * Q * f_{GPL}}$$

$$t_{ads} = 211 \text{ hr}$$

$Y_{in}$ : la teneur en eau dans la charge de GPL.

$\rho_{GPL}$ : Masse volumique de la charge (Lb/ ft<sup>3</sup>).

$Q$ : Débit volumique de la charge (ft<sup>3</sup> / hr)

### III.7.6 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X):

$$X = X_s * \left(1 - \left(\frac{C * H_z}{H_s}\right)\right)$$

$X_s$ : la capacité d'adsorption à l'équilibre neuf à 25°C

$$X = 20,54 \text{ Lb d'eau / 100 Lb de}$$

### III.7.7 Détermination de l'efficacité d'adsorption:

$$EFF = \frac{X}{X_s}$$

$$EFF = 93,35\%$$

Ce qui est remarquable que la quantité d'eau réelle adsorbée a augmenté qui donne une bonne efficacité d'adsorption.

**III.8.1 Calcul du bilan thermique: [10]****❖ Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption  $Q_{des}$ :**

La quantité d'eau adsorbée  $M_{ads} = 1571,58 \text{ Lb}$ .

La chaleur de désorption  $\Delta H = 1800 \text{ BTU/Lb}$ .

D'après l'équation (IV-2):  $Q_{des} = M_{ads} * \Delta H$

$$Q_{des} = 2,83 \ 106 \ \text{BTU}$$

**❖ Calcul des pertes de chaleur  $Q_{perte}$ :**

D'après l'équation (III -5):

$$Q_{pertes} = 0,1 * (Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des})$$

$Q_{acier} = 1,03 \ 106 \ \text{BTU}$ .

$Q_{tamis} = 7,14 \ 105 \ \text{BTU}$ .

$Q_{des} = 2,11 \ 10 \ 6 \ \text{BTU}$ .

$$Q_{perte} = 4,58 \ 105$$

**❖ Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération  $Q_{totale}$  :**

D'après l'équation (III -1):

$$Q_{total} = Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des} + Q_{pertes}$$

$$Q_{totale} = 5.04 \ 106$$

**❖ Calcul de la chaleur fournie par le four  $H_f$  :**

D'après l'équation (III -7):

$$H_f = \frac{Q_{totale}}{\frac{1}{\varepsilon}}$$

$1/\varepsilon = 0,38$

$Q_{totale} = 5.04 \ 106 \ \text{BTU}$ .

$$H_f = 1,3 \ 107 \ \text{BTU} /$$

**❖ Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr »:**

D'après l'équation (IV -8):

$$t_r = \frac{H_f}{\Delta H(T_i - T_e) * M_{GN}}$$

$H_f = 6,23 \ 10^6 \ \text{BTU}$

$\Delta H = 504,3 \ \text{BTU/Nm}^3$ .

$M_{GN} = 2000 \ \text{Nm}^3/\text{hr}$ .

$$tr = 12 \ \text{hr}$$

❖ **Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle  $H_F/CYCLE$ :**

$$t_r = 12 \text{ hr.}$$

$$H_f = 6,23 \cdot 10^6 \text{ BTU / hr.}$$

$$t_{ads} = 211 \text{ hr.}$$

D'après l'équation (III -9):

$$H_{f/cycle} = \frac{H_f \cdot t_r}{t_{ads}}$$

$$H_F / CYCLE = 7,39 \cdot 10^5 \text{ BTU / hr}$$

❖ **Calcul du temps de refroidissement du tamis « $t_{ref}$ »:** [10]

D'après l'équation (III -10):

$$t_{ref} = \frac{Q_{tamis} + Q_{acier}}{Q_{totale}} \cdot t_r$$

$$Q_{totale} = 5,04 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{acier} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{tamis} = 7,14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_r = 12 \text{ hr.}$$

$$t_{ref} = 4,16 \text{ hr}$$

❖ **Calcul de la chaleur soutirée au système  $Q_{ref}$ :**[10]

D'après l'équation (III -11):

$$Q_{ref} = \frac{Q_{tamis} + Q_{acier}}{t_{ref}}$$

$$Q_{acier} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ BTU. -}$$

$$Q_{tamis} = 7,14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_{ref} = 4,16 \text{ hr.}$$

$$Q_{ref} = 4,2 \cdot 10^5 \text{ BTU / hr}$$

**III.9.1 Calcul du bilan de matière de la régénération:** [10]❖ **Calcul du débit du gaz de refroidissement:**

D'après l'équation (III -12):

$$M_{ref} = \frac{Q_{ref}}{\Delta H_{(T_s - T_e)}}$$

$M_r$ : Le débit du gaz de refroidissement (Lb/ hr).

$Q_{ref}$ : la chaleur soutirée au système. (BTU/ hr).

$T_e$  : la température d'entrée du gaz de refroidissement (°F).

$\Delta H_{(T_s - T_e)}$  : La différence de l'enthalpie du gaz de refroidissement (BTU / Nm<sup>3</sup>)

$$Q_{ref} = 3,8310^5 \text{ BTU/hr.}$$

$$\Delta H_{(T_s - T_e)} = 504,3 \text{ BTU/ Nm}^3.$$

$$T_S = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 440,6^\circ\text{F} = 500 \text{ }^\circ\text{K}.$$

$$T_E = 12,7 \text{ }^\circ\text{C} = 54,86 \text{ }^\circ\text{F} = 285,7 \text{ }^\circ\text{K}.$$

$$= 833,23 \text{ Nm}^3 / \text{hr}$$

### III.9.2 Calcul des pertes de charges:

❖ Calcul de la perte de charge  $\Delta P/L_1$  pour le GN chaud: [10]

❖ Calcul de la vitesse superficielle  $U_1$  à travers le lit:

$$S = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$S = 5,411 \text{ ft}^2$$

$$U_1 = \frac{M_{GN}}{60 * 5 * f_{GN}}$$

$$U_1 = 125,94 \text{ ft} / \text{min}$$

❖ Calcul de la viscosité du GN chaud  $\mu_1$ : [10]

Connaissant la densité relative  $d_r$  et la pression de régénération:

$$P = 4,5 \text{ kg/cm}^2 = 450 \text{ Kpas}.$$

$$d_r = M_{GN} / M_{air} = 0,64$$

$$T = 280 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\mu_1 = 0,02 \text{ CP. (Voir l'annexe F).}$$

D'après l'équation (III -13):

$$\Delta P / L_1 = (A * U_1 * \mu_1) + (B * \rho_{GN} * U_1^2)$$

$\Delta P/L_1$  : la perte de charge par unité de longueur (psi / ft).

$\mu_1$ : la viscosité du GN (Cp).

$U_1$ : la vitesse superficielle (ft / min).

$\rho_{GN}$ : la masse volumique du GN (Lb/ft<sup>3</sup>).

A et B : des constantes relatives aux dimensions des particules du tamis.

$$A = 0,0561, B = 0,000088$$

$$\Delta P/L_1 = 0,42 \text{ psi/ft}$$

❖ Calcul de Re 1 :

$$D_P = 0,01 \text{ ft}.$$

$$\mu_1 = 0,02 \text{ CP} = 0,04 \text{ Lb /ft. hr. (Voir annexe C).}$$

$$G = M_g / S = 680,37 \text{ Lb} / \text{ft}^2 \cdot \text{hr}$$

D'après l'équation (III -14):

$$Re = \frac{G * D_p}{\mu}$$

$$Re_1 = 170,09$$

❖ Calcul de la perte de charge  $\Delta P/L_2$  pour le GN froid: [10]

❖ Calcul de la vitesse superficielle  $U_2$  à travers le lit:

$$S = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$S = 5,411$$

$$\rho_{GN} = 3,88 \text{ Kg} / \text{m}^3 = 0,24 \text{ Lb} / \text{ft}^3.$$

$$M_g = M_{ref} = 760 \text{ Nm}^3 / \text{hr} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Lb} / \text{h}$$

$$U_2 = \frac{M_{GN}}{60 * 5 * f_{GN}}$$

$$U_2 = 23,96 \text{ ft} / \text{min}$$

❖ Calcul de la viscosité du GN froid  $\mu_2$ :

Connaissant la densité relative  $d_r$  et la pression de régénération:

$$P = 4,5 \text{ Kg} / \text{cm}^2 = 450 \text{ Kpas}.$$

$$d_r = M_{GN} / M_{air} = 0,64 \text{ T} = 12,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\mu_2 = 0,01 \text{ C}_P = 0,03 \text{ Lb} / \text{ft} \cdot \text{hr}.$$
 (Voir annexe C)

D'après l'équation (III -13):

$$\Delta P / L_2 = (A * U_2 * \mu_2) + (B * \rho_{GN} * U_2^2)$$

$$\Delta P / L_2 = 0,049 \text{ psi} /$$

❖ Calcul de  $Re_2$ :

$$D_p = 0,01 \text{ ft} \text{ (Voir annexe B)}$$

$$\mu_2 = 0,01 \text{ C}_P = 0,03 \text{ Lb} / \text{ft} \cdot \text{hr}$$

$$G = M_g / S = 258,73 \text{ lb} / \text{ft}^2 \cdot \text{hr}$$

D'après l'équation (III -14) :

$$Re = \frac{G * D_p}{\mu}$$

$$Re_2 = 86,24$$

### III.9.3 Interprétation des résultats :

D'après tous les résultats obtenus, on a réalisé le but de notre travail en modifiant le temps d'adsorption du déshydrateur de charge de 36 heures (le temps de design), au temps obtenu après les calculs qui correspond à 211 heures.

Avec cette augmentation du temps d'adsorption il y'aura :

- ❖ Une diminution de nombre de cycles au temps, par conséquent une augmentation de l'efficacité du tamis.
- ❖ Des pertes de charges pour le réchauffage et le refroidissement vérifiant l'intervalle recommandé.
- ❖ Un régime d'écoulement turbulent qui favorise un bon transfert de masse, ainsi qu'une bonne distribution des gaz à travers le lit.

### III.10 Etude de la deuxième solution:

Cette solution est basée sur l'optimisation des paramètres de la régénération sans modifier le cycle d'adsorption (36 h).

On veut étudier l'impact du temps de chauffage sur la quantité de chaleur nécessaire à la régénération du sécheur est celle fournie par le four par cycle.

#### III.10.1 Calcul de débit d'eau: [10]

$$q_w = \frac{4 * Y_{in} * Q * f_{GPL}}{\pi * D_L}$$

$Y_{in}$ : la teneur en eau dans la charge de GPL  $Y_{in} = 25$  ppm

$$q_w = 0,2 \text{ (Lb/ft}^2 \text{ .hr)}$$

#### III.10.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse : [10]

$$H_z = \frac{225 * Q_w^{0.7895}}{U_{act}^{0.5506} * Y_{in}^{0.2646}}$$

$ft = 0,23$  m

$$H_z = 9,26 \text{ inch} = 0,76$$

#### III.10.3 Estimation de la quantité d'eau adsorbée $M_{ads}$ :

$$M_{ads} = Y_{in} * Q_v * \rho_{gpl} * \theta$$

$Y_{in}$ : Concentration de l'eau en ppm = 0,000025

$Q_v$ : Débit volumique du produit = 8675,09 (ft<sup>3</sup> / hr)

$\rho_{gpl}$ : Masse volumique de la charge = 33,09 (lb / ft<sup>3</sup>)

$$M_{ads} = 257.67 \text{ Lb}$$

$\theta$ : le temps d'adsorption = 36 (h)

### III.10.4 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre:

$$H_s = H_t - H_z$$

$$H_s = 5,15 \text{ ft} = 1,56 \text{ m}$$

### III.10.5 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X):

$$X = X_s * \left(1 - \left(\frac{C * H_z}{H_s}\right)\right)$$

$$X = 20,54 \text{ Lb d'eau / 100 Lb de dessicant}$$

### III.10.6 Détermination de l'efficacité d'adsorption:

$$EFF = \frac{X}{X_s}$$

$$EFF = 93,35\%$$

### III.10.7 Calcul du bilan thermique: [10]

#### ❖ Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption $Q_{des}$ :

La quantité d'eau adsorbée  $M_{ads} = 258,35 \text{ Lb}$ .

La chaleur de désorption  $\Delta H = 1800 \text{ BTU/Lb}$ .

D'après l'équation (III -2):

$$Q_{des} = M_{ads} * \Delta H$$

$$Q_{des} = 4,63 \cdot 10^5$$

#### ❖ Calcul des pertes de chaleur $Q_{perte}$ :

$$Q_{acier} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{tamis} = 7,14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$Q_{des} = 4,65 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

D'après l'équation (III -5):

$$Q_{pertes} = 0,1 * (Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des})$$

$$Q_{perte} = 2,21 \cdot 10^5 \text{ BTU}$$

#### ❖ Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération $Q_{totale}$ : [10]

D'après l'équation (III -1):

$$Q_{total} = Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des} + Q_{pertes}$$

$$Q_{totale} = 2,43 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

#### ❖ Calcul de la chaleur fournie par le four $H_f$ : [11]

D'après l'équation (III -7):

$$H_f = \frac{Q_{totale}}{\frac{1}{\varepsilon}}$$

$$1/\varepsilon = 0,3898.$$

$$Q_{\text{totale}} = 2,43 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

$$H_f = 6,23 \cdot 10^6$$

❖ **Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr » : [10]**

D'après l'équation (III -8):

$$t_r = \frac{H_f}{\Delta H(T_i - T_e) \cdot M_{GN}}$$

$$t_r = 6,35$$

$$H_f = 6.40 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$\Delta H = 504,3 \text{ BTU/Nm}^3.$$

$$M_{GN} = 2000$$

❖ **Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle  $H_f/CYCLE$  : [10]**

$$t_r = 6,17 \text{ hr.}$$

$$H_f = 6,23 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$t_{\text{ads}} = 36 \text{ hr.}$$

D'après l'équation (III -9):

$$H_{f/cycle} = \frac{H_f \cdot t_r}{t_{\text{ads}}}$$

$$H_f / CYCLE = 1,12 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

❖ **Calcul du temps de refroidissement du tamis « t<sub>ref</sub> » :**

D'après l'équation (III -10):

$$t_{\text{ref}} = \frac{Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}}}{Q_{\text{totale}}} t_r$$

$$Q_{\text{totale}} = 2,43 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7,14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_r = 6,35$$

$$t_{\text{ref}} = 4,57 \text{ hr}$$

❖ **Calcul de la chaleur soutirée au système  $Q_{\text{ref}}$  :**

D'après l'équation (III -11):

$$Q_{\text{ref}} = \frac{Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}}}{t_{\text{ref}}}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7,14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_{\text{ref}} = 4,57 \text{ hr}$$

$$Q_{\text{ref}} = 3.83 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr}$$

**III.10.8 Calcul du bilan de matière de la régénération: [10]**

❖ **Calcul du débit du gaz de refroidissement:**

D'après l'équation (III -12):

$$M_{ref} = Q_{ref} / \Delta H(T_s - T_e)$$

$$Q_{ref} = 3.83 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr.}$$

$$\Delta H_{(T_s - T_e)} = 507,42 \text{ BTU/ Nm}^3.$$

$$T_s = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 440,6 \text{ }^\circ\text{F} = 500 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$T_e = 12,7 \text{ }^\circ\text{C} = 54,86 \text{ }^\circ\text{F} = 285,7 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$M_{ref} = 753.82 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

### III.10.9 Interprétation des résultats :

Sur la base des résultats obtenus, il est évident que le temps de régénération a été modifié, réduisant le temps de chauffage jusqu'à 6 h 35 min et le temps de refroidissement de 4 h 48 min sans affecter la durée du cycle d'adsorption de 36 h.

Cette modification montre des économies moins importantes en termes d'énergie fournie par le four à chaque cycle de fonctionnement, puisque le cycle d'adsorption plus long consomme la même quantité de gaz naturel que le cycle d'adsorption de 36 heures. Pendant la phase d'adsorption, le dessicant est rempli d'humidité, atteignant ainsi un état saturé d'équilibre. Le dessicant saturé n'est plus adsorbé et l'humidité doit être éliminée par chauffage pendant le processus de chargement. Dans notre cas, le lit n'est pas complètement saturé et le lit chauffant La partie sèche devient inutile et peut provoquer une détérioration du tamis réduisant son efficacité ce résultat sera vérifié quelle que soit la teneur en eau de la charge.

### III. 11 Explication et sélection de la solution optimale :

D'après l'ensemble des résultats obtenus, le fonctionnement de la section de déshydratation des aliments ne pourra être optimisé qu'en réalisant la **meilleure** solution au problème posé, à savoir : augmenter le temps d'adsorption du sécheur. Cette augmentation apporte d'autres avantages au système car elle réduira le nombre de cycles par mois et réduira le nombre de régénérations, ce qui se traduira par :

- ❖ Réduction de la consommation de gaz naturel lors de la régénération de la séquence de refroidissement.

- ❖ La chaleur fournie par le four pour la séquence de chauffage est réduite, calculée en fonction de la saturation totale du lit, car si l'on chauffe un lit qui n'est que partiellement rempli d'eau, l'énergie utilisée pour chauffer un tamis qui ne contient pas d'eau est tout simplement gaspillé.

- ❖ Prolonger la durée de vie des tamis moléculaires.
- ❖ Le produit GPL capturé dans le tamis moléculaire est moins perdu lors du processus de régénération. L'efficacité du criblage augmente en raison de la destruction réduite des cristaux

### III.12 Comparaison entre les deux solutions optimales :

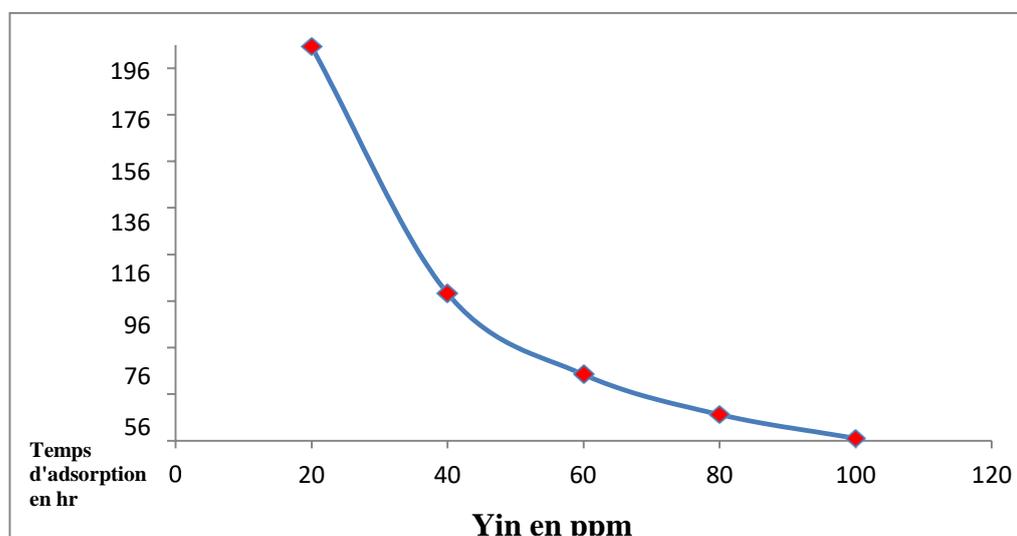
#### III.12.1 Première solution :

En fixe le temps de régénération puis en varie le temps d'adsorption.

**Tableau III.6 :** La variation du temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau pour un temps de régénération fixé

Teneur en eau en ppm	100	80	60	40	25
Temps d'adsorption	36	47,23	64,77	100,05	211
Temps de Réchauffage	11	11	11	11	11
Nombre d'heures par ans	8760	8760	8760	8760	8760
Débit de Réchauffage	2000	2000	2000	2000	2000
Nombre de régénération par un an	243	185	135	87	53
Quantité de GN pour le réchauffage pendant une regeneration	22000	22000	22000	22000	22000
Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an	5346000	4070000	2970000	1914000	1166000
Gain en GN par ans et par train en Nm <sup>3</sup>		1276000	2376000	3432000	4180000

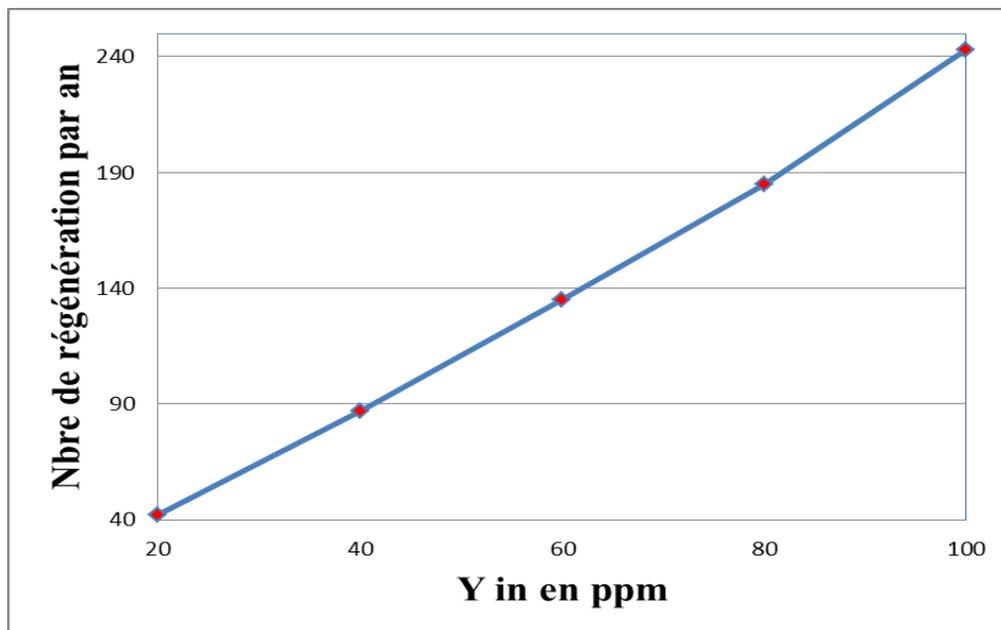
La représentation graphique de la prolongation du temps d'adsorption est illustrée par la figure suivante. Une simple interpolation, nous permet de déterminer le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau dans la charge.



**Figure III.1:** Le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau

Nous remarquons que le temps d'adsorption augmente avec la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL.

La figure ci-dessous montre l'augmentation du nombre de régénération par an en fonction de la teneur en eau dans la charge et ce pour une séquence d'adsorption adaptée à cette teneur.



**Figure III.2:** le nombre de régénération par an en fonction de la teneur en eau.

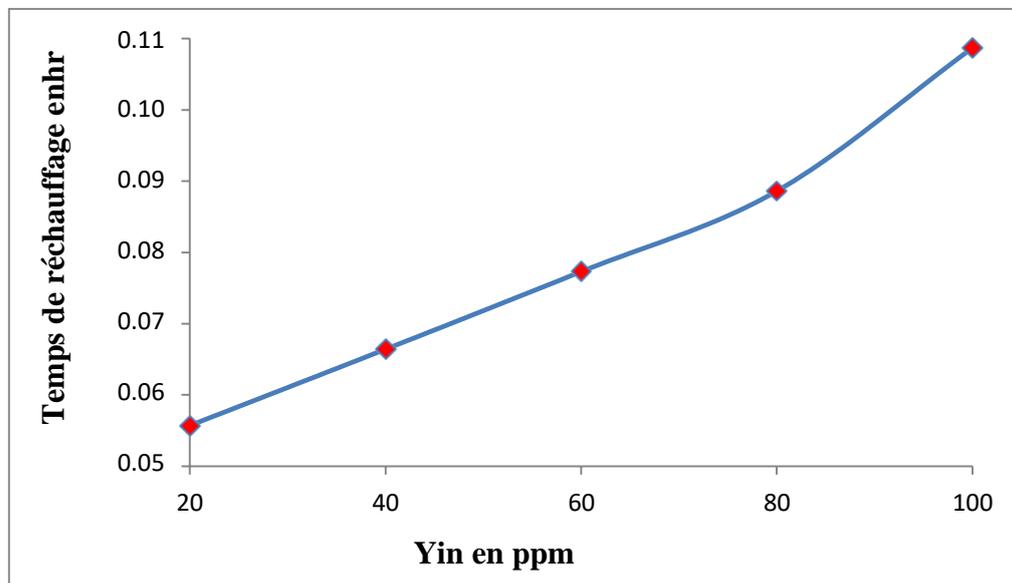
### III.12.2 Deuxième solution :

En fixe le temps d'adsorption puis en varie le temps régénération. Les résultats obtenus sont montrés par le tableau III-7.

**Tableau III.7:** La variation du temps de régénération en fonction de la teneur en eau pour un temps d'adsorption fixé.

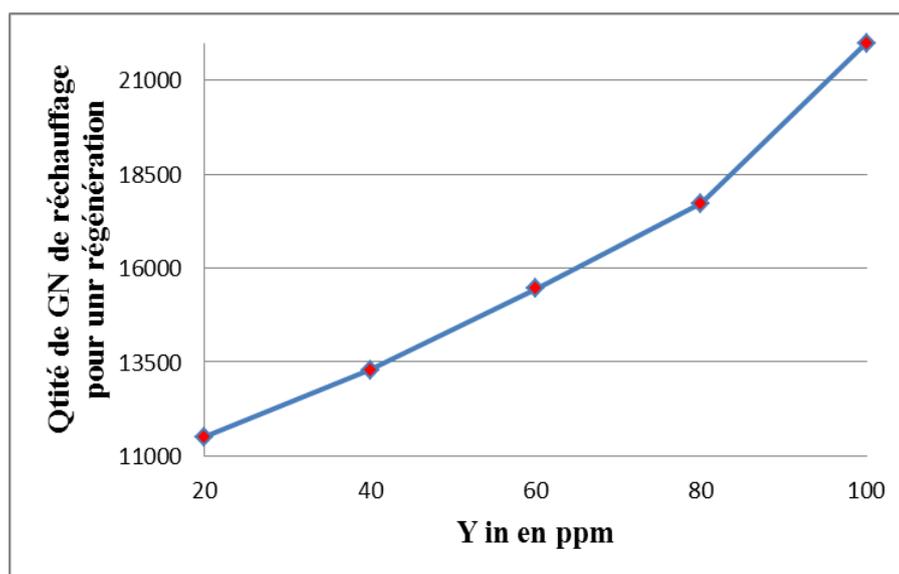
Teneur en eau en ppm	100	80	60	40	25
Temps d'adsorption (hr)	36	36	36	36	36
Temps de réchauffage (hr)	11	8,86	7,73	6,64	6.35
Nombre d'heures par an	8760	8760	8760	8760	8760
Débit de réchauffage (m <sup>3</sup> /hr)	2000	2000	2000	2000	2000
Nombre de régénération par un an	243	243	243	243	243
Quantité de GN pour le réchauffage pendant une régénération (m <sup>3</sup> )	22000	17720	15460	13280	12340
Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an	5346000	4305960	3756780	3227040	2998620
Gain en quantité de GN par ans et par train en Nm <sup>3</sup>		1040040	1589220	2118960	2347380

Le temps de chauffage calculé en fonction de la teneur en eau dans la charge, tout en gardant le temps d'adsorption fixé à 36 h, est illustré par la figure suivante.



**Figure III.3:** Le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau.

Nous remarquons que le temps de réchauffage diminue proportionnellement avec la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL. Cela implique que l'énergie dépensée pour la séquence de chauffage diminue en fonction de la diminution du temps de chauffage et par conséquent en fonction de la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL. La figure ci-dessous montre cette conclusion.



**Figure III.4:** Quantité de GN utilisée pendant une régénération en fonction de la teneur en eau pour la deuxième solution.

### III.3 Etude économique des résultats de la solution optimale :

#### III.13.1 Gain en gaz naturel :

Pour un cycle d'adsorption de 211 heures (pour une teneur en eau à l'entrée du déshydrateur de charge égale à 25 ppm maximal et une teneur à la sortie de l'ordre de 5 ppm on a trouvé que le temps d'adsorption s'élève à 211hr) est détaillé ci-dessous

- Le nombre de cycle /mois = nombre d'heures par mois / durée d'un cycle

$$= 720 / 211 = 4 \text{ cycles.}$$

- Le débit de GN durant :

Le chauffage :  $2000 \text{ Nm}^3 / \text{hr}$

Le refroidissement :  $760 \text{ Nm}^3 / \text{hr}$ .

- Le nombre de cycle actuel =  $720 / 36 = 20$  cycles.
- Le nombre de cycle gagnés par mois pour un train = (nombre de cycle actuel – le nombre de cycle plus long) =  $20 - 4 = 16$  cycles.

(10,91 heures de réchauffage et 4,48 heures de refroidissement).

- Le gain en GN chaud pour un train par mois =  $16 * 10,91 * 2000$

$$= 3491200 \text{ Nm}^3 / \text{mois}$$

□ Et pour 9 trains =  $349120 * 9 = 3142080 \text{ Nm}^3 / \text{mois}$ .

- Le gain en GN froid pour un train par mois =  $16 * 4,48 * 760$

$$= 54476,8 \text{ Nm}^3 / \text{mois}$$

- Et pour 9 trains =  $54476,8 * 9 = 490291,2 \text{ Nm}^3 / \text{mois}$

- Prix unitaire du GN:  $10^3 \text{ Contra m}^3 = 1341,39 \text{ DA}$

□  $1 \text{ Nm}^3 = 1,255 \text{ DA}$

- Le gain en GN pour 9 trains par mois :

Le GN de chauffage :  $1,255 * 3142080 = 3,9 * 10^6 \text{ DA}$ .

Le GN de refroidissement :  $1,255 * 490291,2 = 0,61 * 10^6 \text{ DA}$ .

La moitié de la quantité du GN de régénération est récupérée au niveau du four. Ainsi le gain réel mensuel pour les 9 trains' sera:

$$= (3.9 + 0.61) / 2 * 10^6 = 2,255 * 10^6 \text{ DA}$$

\* Le gain réel annuel pour 9 trains par an =  $12 * 2,255 * 10^6$

$$= 27,06 * 10^6 \text{ DA.}$$

### III.13.2 Gain en vie du tamis moléculaire:

\* La quantité totale de tamis moléculaire d'un déshydrateur est de 4 653 kg D'après le coût de changement de tamis du train 200 (mars 2017) on a:

\* Le prix du tamis est de 355,08 DA/kg.

\* Un déshydrateur revient 1 652 168 DA ( $4653 * 355,08$ ).

\* La durée de vie actuelle du tamis moléculaire est de 3 ans

\* Le changement des tamis de la phase I et la phase III se fait tous les 9 ans du fait qu'il y a 3 déshydrateurs par train.

\* Le changement des tamis de la phase II se fait tous les 6 ans du fait qu'il y a 2 déshydrateurs par train.

\* Le coût de l'opération de changement du tamis moléculaire d'un déshydrateur chaque année revient:

- Pour la phase I 183 574,2 DA ( $1\ 652\ 168 / 9$ ).

- Pour la phase II 275 361,3 DA ( $1\ 652\ 168 / 6$ ).

- Pour la phase III 183 574,2 DA ( $1\ 652\ 168 / 9$ ).

• Cela correspond à un cycle de 55 heures (36 heures adsorption et 19 heures de régénération) pour un sécheur.

• Avec un cycle d'adsorption de 230 heures (211 heures adsorption et 19 heures de régénération) la durée de vie du sécheur dans la phase I et la phase III devient :

$$230 * 9 / 55 = 37.6 \text{ ans} \approx 38 \text{ ans}$$

• Le tamis moléculaire de la phase I avec le nouveau cycle reviendrait à 55072,26 DA ( $1\ 652\ 168 / 30$ ) soit un gain annuel de 128501,94 DA ( $183\ 574,2 - 55072,26$ ).

La durée de vie du sécheur dans la phase II devient :  $230 * 6 / 55 = 25 \text{ ans}$

- Le tamis moléculaire de la phase II avec le nouveau cycle reviendra à 82608,4 DA (1 652 168 /20).soit un gain annuel de 192752,9 DA (275 361,3 - 82608,4).
- Le tamis moléculaire de la phase III avec le nouveau cycle reviendrait à 55072,26 DA (1 652 168 /30) soit un gain annuel de 128501,94 DA (183 574,2 - 55072,26).
- Un gain annuel total pour le complexe de 3469552.34 DA $[(128501,94*12) + (192752,9*4) + (128501,94 *9)]$ .  
Conclusion des résultats est représentée sur le tableau III.8

**Tableau III.8:** Le gain annuel en GN et en vie des tamis pour le cycle calculé.

	<b>cycle calculé</b>
<b>Gain annuel en GN pour 9 trains en DA</b>	<b>27,06 10<sup>6</sup></b>
<b>Gain annuel en vie des tamis pour le complexe en DA</b>	<b>3,47 10<sup>6</sup></b>

## Conclusion générale

L'objectif du complexe GP1/Z est de réduire la teneur en eau de l'alimentation d'un maximum de 100 ppm à 1 ppm dans la section de déshydratation.

Il nous semble nécessaire d'étudier cette problématique lors de formations pour optimiser les paramètres de fonctionnement de la partie égouttage des charges.

Un temps d'adsorption plus long entraîne un gain d'énergie car la même quantité de gaz naturel que dans le cycle d'adsorption actuel sera utilisée dans le cycle plus long. En plus des buffs obtenus en GN, des buffs supplémentaires peuvent être obtenus en :

- ❖ La durée de vie de l'écran sera plus longue car le vieillissement de l'écran est principalement dû au dépôt de dépôts de carbone à haute température.

À mesure que le temps d'adsorption augmente, le nombre de régénérations diminue, de sorte que l'écran est moins exposé aux températures élevées pendant le processus de chauffage.

- ❖ L'équipement dure plus longtemps car il y a moins de cycles et l'équipement est moins contraint en pression (moins de séquences de pressurisation et dépressurisation) et en température (chauffage et refroidissement).

- ❖ La durée de vie et la séquence des vannes sont gérées par l'ouverture et la fermeture des vannes.

Avec cette optimisation, nous pouvons économiser ( $4,02 \cdot 10^7 \text{Nm}^3$ ) de GN par an, ce qui se traduit par des valeurs ( $27,06 \cdot 10^6 \text{DA}$ ).

La valeur ajoutée annuelle des tamis moléculaires est de  $3,47 \cdot 10^6 \text{DA}$ .

## **Bibliographie**

[1]. Manuel opératoire ; process : volume 1 et 2.

Document GP1-Z

[2]. Déshydratation Bloc 11, module 3.

[3]. Manuel opératoire ; section déshydratation.

Document GP1-Z

[4]. DATA BOOK Déshydratation and treating.

Section 15,9 ème édition, Rev (1974 – 1976)

[5]. Polycope I.A.P “ propane liquide déshydratation usine moléculaire Seive”

[6]. Grace ; les tamis moléculaire Caractéristiques et Applications Western Germany ; Juin 1980.

[7]. Kohl & Richard - Gas Purification 5E [1]

[8] Catalogue mécanique ; manuel : volume 1.

Document GP1/Z

[9]. Catalogue Mécanique ; process 3 : volume 1.

IHI GP-1Z.

[10]. RUTHVEN D. M; Principles of Adsorption and Adsorption Process

John Wiley et sons, New York.

[11]. Formation perfectionnement d'ingénieur.

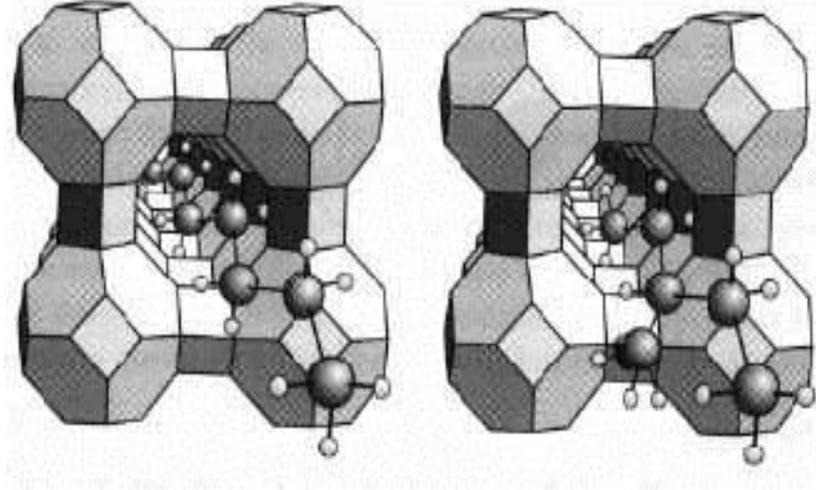
[12]. Sherwood; Properties of Gaz and Liquids.

[13]. P.Wuithier Raffinage et génie chimique

Edition tech.paris 1972 TOME

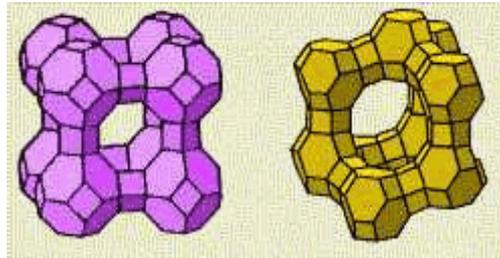
## Annexe A : Structure des tamis moléculaires

### Tamis moléculaires



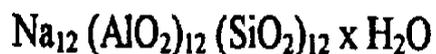
Structure de zéolithe de type A

Structure de zéolithe de type X



## Annexe B : PROPRIETES PHYSIQUE DE L'ADSORBANT (TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES)

### CHEMICAL FORMULA



### Conditions d'expédition

Le tamis moléculaire de type 4A-DG TRISIV 1/8 est disponible sous forme de granulés de 3,2 mm. Il est expédié sous containers acier, d'un poids net de 135 kg le container.

Propriétés typiques	Granulés 1/8"
Diamètre nominal des pores	4 angströms
Densité "non tassé" (moyenne)	640 kg/cm <sup>3</sup>
Densité "tasse"	624 à 657 kg/m <sup>3</sup>
Diamètre particule	3,2 mm
Résistance à l'écrasement	6,8 à 7,7 kg
Chaleur d'adsorption (max.)	1.000 kcal/kg H <sub>2</sub> O
Capacité en eau à l'équilibre*	22% en poids
Teneur en eau (à l'emballage)	1,5% en poids

\* En Lbs d'eau/100 lbs d'adsorbant activité à 17,5 mm Hg, 25°C.

Annexe C : Coefficient de l'équation d'enthalpie  $H^\circ$ 

Tableau 2.1 - Coefficients des équations du pouvoir calorifique, de l'enthalpie et de l'entropie des mélanges de gaz parfaits.

No. CPT	Composant	A	B	C x 10 <sup>3</sup>	D x 10 <sup>6</sup>	E x 10 <sup>8</sup>	F x 10 <sup>9</sup>	G	Intervalle °C
<i>Non-Hydrocarbonés</i>									
1	Oxygène	-2,283574	0,952440	-0,281140	0,655223	-0,452316	1,087744	2,080310	-175 to 1200
2	Hydrogène	28,671997	13,396156	2,960131	-3,980744	2,661667	-6,099863	-11,801371	-175 to 1200
3	Eau	-5,729915	1,915007	-0,395741	0,876232	-0,495086	1,038613	0,702815	-175 to 1200
4	Sulfure d'hydrogène	-1,437049	0,998865	-0,184315	0,557087	-0,317734	0,636644	1,394812	-175 to 1200
5	Azote	-2,172507	1,068490	-0,134096	0,215569	-0,078632	0,069850	1,805409	-175 to 1200
6	Ammoniac	-2,202606	2,010317	-0,650061	2,373264	-1,597595	3,761739	0,990447	-175 to 1200
7	Carbone	9,572700	-0,199901	1,535456	0,267516	-0,811532	2,726889	1,687611	-175 to 1200
8	Monoxyde de carbone	-2,269176	1,074015	-0,172664	0,302237	-0,137533	0,200365	2,018445	-175 to 1200
9	Dioxyde de carbone	11,113744	0,479107	0,762159	-0,359392	0,084744	-0,057752	2,719180	-175 to 1200
10	Dioxyde de soufre	3,243188	0,461650	0,248915	0,120900	-0,188780	0,568232	2,086924	-175 to 1200
<i>Paraffines</i>									
11	Méthane	-16,228549	2,393594	-2,218007	5,740220	-3,727905	8,549685	-0,339779	-175 to 1200
12	Ethane	-0,049334	1,108992	-0,188512	3,965580	-3,140209	8,008187	1,995889	-175 to 1200
13	Propane	-1,717565	0,722648	0,708716	2,923895	-2,615071	7,000545	2,289659	-175 to 1200
14	n-Butane	17,283134	0,412696	2,028601	0,702953	-1,025871	2,883394	2,714861	-75 to 1200
15	2-Méthylpropane	26,744208	0,195448	2,523143	0,195651	-0,772615	2,386087	3,466595	-75 to 1200
16	n-Pentane	63,201677	-0,011701	3,316498	-1,170510	0,199648	-0,086652	4,075275	-20 to 1200
17	2-Méthylbutane	64,252075	-0,131900	3,541156	-1,333225	0,251463	-0,129589	4,572976	-20 to 1200
18	2,2-Diméthylpropane	27,380416	0,018305	3,063221	-0,375030	-0,530964	2,059134	3,388342	-75 to 1200
19	n-Hexane	-17,191071	0,959226	-0,614725	6,142101	-6,160952	20,868190	-0,207040	-75 to 700
20	2-Méthylpentane	33,798408	0,173685	2,348998	0,844100	-1,559115	5,534684	2,968423	-75 to 700
21	3-Méthylpentane	17,964768	0,397799	1,209870	3,254556	-3,942661	14,384148	2,149541	-75 to 700
22	2,2-Diméthylbutane	92,706801	-0,500323	4,525783	-2,415290	0,713199	-0,591097	5,617113	-20 to 700
23	n-Heptane	-0,153725	0,754499	0,261728	4,366358	-4,484510	14,842099	0,380048	-75 to 700
24	2-Méthylhexane	17,893709	0,404849	1,334653	2,877698	-3,511818	12,540055	1,823456	-75 to 700
25	3-Méthylhexane	36,807299	0,167431	2,262250	1,067097	-1,781538	6,169491	2,864993	-75 to 700
26	2,4-Diméthylpentane	11,508769	0,093303	2,598254	0,630349	1,428307	4,569218	2,847131	-20 to 700
27	n-Octane	2,604725	0,724670	0,367845	4,142833	-4,240199	13,734055	0,327588	-75 to 700
28	2,2-Diméthylhexane	21,451302	0,226073	2,074483	1,466277	-2,169048	7,742088	2,139163	-20 to 700
29	2-Méthylheptane	27,405630	0,305110	1,826883	1,744174	-2,311344	7,752627	2,038844	-75 to 700
30	2,2,4-Triméthylpentane	26,118096	0,039675	2,742294	0,328610	-1,206014	4,586420	2,846608	-75 to 700
31	n-Nonane	4,000278	0,707805	0,438048	3,969342	-4,043158	12,876028	0,257265	-75 to 700
32	n-Décane	-6,962020	0,851375	-0,263041	5,521816	-5,631733	18,885443	-0,412446	-75 to 700
33	n-Undécane	65,290564	-0,099827	3,472495	-1,354336	0,264721	-0,145574	3,407959	-20 to 1200
34	m-Dodécane	60,967391	-0,077548	3,420649	-1,308559	0,247576	-0,130380	3,227042	-20 to 1200
35	n-Tridécano	62,748642	-0,096018	3,463033	-1,353243	0,264564	-0,145439	3,245905	-20 to 1200
36	n-Tétradécane	61,655096	-0,092312	3,452192	-1,345181	0,261574	-0,143007	3,172971	-20 to 1200
37	n-Pentadécane	62,217244	-0,100961	3,472075	-1,366935	0,269684	-0,150082	3,163060	-20 to 1200
38	n-Hexadécane	60,927011	-0,095563	3,459313	-1,356807	0,265935	-0,146753	3,095128	-20 to 1200
39	n-Heptadécane	60,853132	-0,098655	3,465969	-1,365557	0,269340	-0,149768	3,071276	-20 to 1200
40	n-Octadécane	60,419501	-0,098876	3,466295	-1,367430	0,270024	-0,150334	3,038272	-20 to 1200
41	n-Nonadécane	59,195816	-0,092752	3,451465	-1,354690	0,265281	-0,146249	2,979932	-20 to 1200
42	n-Eicosane	59,163624	-0,095147	3,456592	-1,360776	0,267410	-0,147933	2,963523	-20 to 1200

$H = 0$  kJ/kg pour le gaz parfait à 0 K.

$S = 1$  kJ/kg K pour le gaz parfait à 0 K et 1 kPa

Les unités sont le kJ/kg pour l'enthalpie, le kJ/kg K pour le pouvoir calorifique et l'entropie.

# Annexe D : Facteur de compressibilité Z

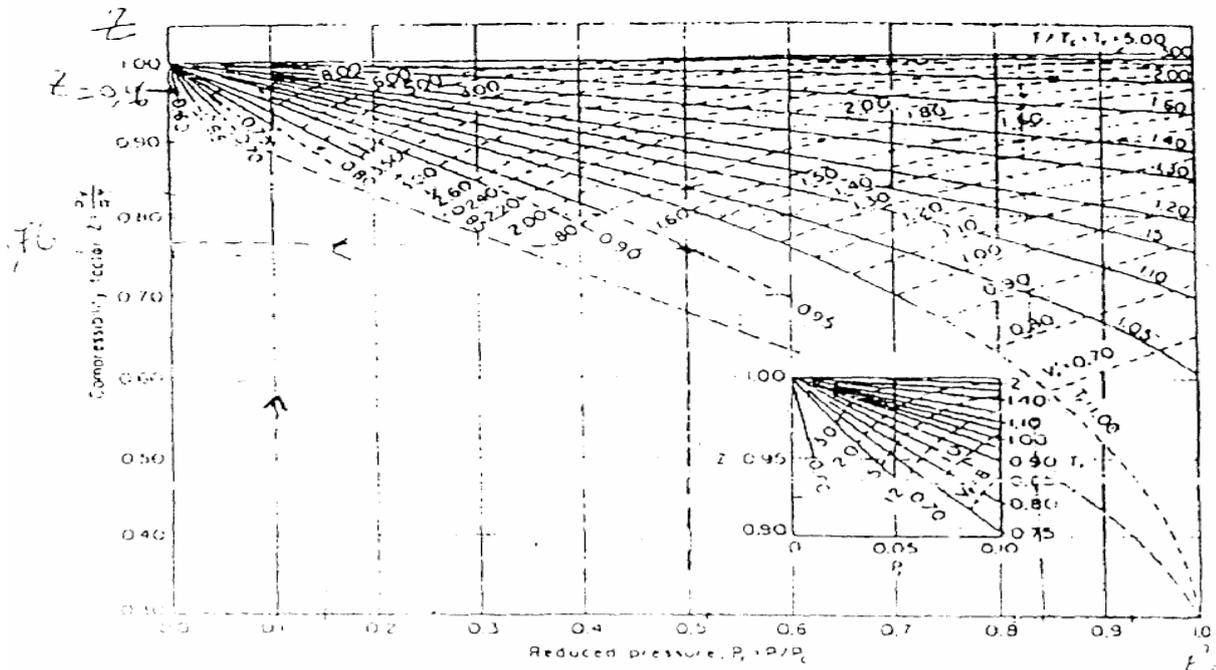


Figure 12-1 Generalized compressibility charts

$$\frac{v}{v_c} = \frac{Z_c}{Z} \frac{T_c}{T}$$

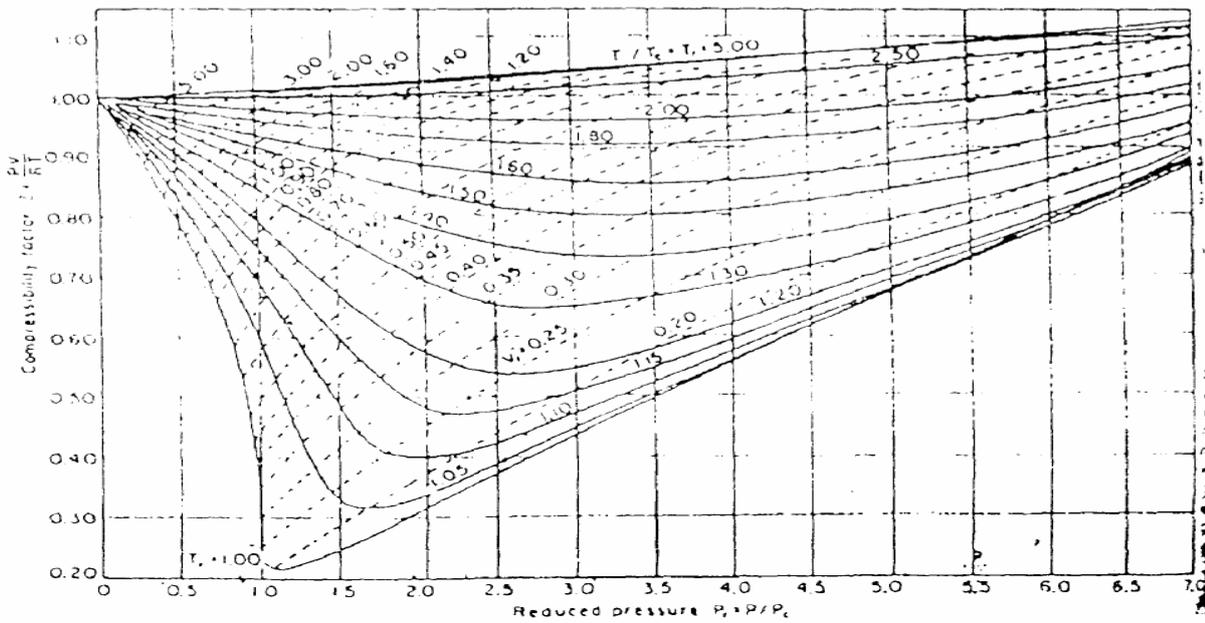


Figure 12-2 Determination du coefficient de compressibilité Z.

# Annexe E : Constantes critiques de pression et de température

NOTE: Numbers in this table do not have accuracies greater than 1 part in 1000; in some cases extra digits have been added to calculated values to achieve internal consistency or to permit recalculation of experimental values.

## PHYSICAL CONSTANTS

\*See the Table of Notes and References.

Number	See Note No. →	Compound	Formula	A.				Critical constants			Number	
				Molar mass (molecular weight)	Boiling point, °F 14.696 psia	Vapor pressure, psia 100 °F	Freezing point, °F 14.696 psia	Refractive index, $n_D$ 60 °F	Pressure, psia	Temperature, °F		Volume, ft <sup>3</sup> /lb
1		Methane	CH <sub>4</sub>	16.043	-258.72	(5000)*	-296.41*	1.00041*	667.0	-116.66	0.0988	1
2		Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	-127.46	(800)*	-297.02*	1.20971*	707.8	90.07	0.0783	2
3		Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	-43.73	188.88	-305.72*	1.29480*	615.0	205.92	0.0727	3
4		Isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	10.78	72.598	-255.26	1.3245*	527.9	274.41	0.0714	4
5		n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	31.08	51.719	-217.03	1.33588*	548.8	305.51	0.0703	5
6		Isopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	82.09	20.450	-255.80	1.34771	490.4	368.96	0.0684	6
7		n-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	96.89	15.580	-201.48	1.35165	488.1	385.7	0.0695	7
8		Neopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	49.10	36.72	2.16	1.342*	464.0	321.01	0.0673	8
9		n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	155.70	4.9614	-139.56	1.37708	439.5	451.8	0.0688	9
10		2-Methylpentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	140.44	6.769	-244.60	1.36571	436.6	435.76	0.0682	10
11		3-Methylpentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	145.86	6.103	-261.20	1.37090	452.5	448.2	0.0682	11
12		Neohexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	121.50	9.859	-147.68	1.36283	446.7	419.92	0.0667	12
13		2,3-Dimethylbutane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	136.33	7.406	-199.35	1.36938	454.0	440.08	0.0665	13
14		n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	209.07	1.6211	-130.99	1.38234	397.4	510.9	0.0682	14
15		2-Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	194.05	2.273	-180.87	1.37940	396.0	494.44	0.0673	15
16		3-Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	197.33	2.130	—	1.38326	407.6	503.62	0.0646	16
17		3-Ethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	200.26	2.012	-181.44	1.38800	419.2	513.16	0.0665	17
18		2,2-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	174.50	3.494	-190.80	1.37667	401.8	476.98	0.0665	18
19		2,4-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	176.85	3.294	-182.59	1.37591	397.4	475.72	0.0667	19
20		3,3-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	186.87	2.775	-209.99	1.38564	427.9	505.60	0.0662	20
21		Triptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	177.54	3.376	-12.21	1.38411	427.9	496.24	0.0636	21
22		n-Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	258.17	0.5374	-70.17	1.39248	361.1	563.5	0.0673	22
23		Diisobutyl	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	228.34	1.102	-132.09	1.38735	361.1	530.26	0.0676	23
24		Isooctane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	210.58	1.709	-161.23	1.38624	372.7	519.28	0.0657	24
25		n-Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128.258	303.40	0.1716	-64.26	1.40054	330.7	610.8	0.0693	25
26		n-Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.285	345.40	0.06091	-21.33	1.40720	304.6	652.2	0.0702	26
27		Cyclopentane	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.134	120.60	9.917	-136.89	1.40050	653.8	461.1	0.0594	27
28		Methylcyclopentane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.161	161.29	4.491	-224.38	1.40400	548.8	499.28	0.0607	28
29		Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.161	177.40	3.267	43.79	1.42053	590.7	536.6	0.0586	29
30		Methylcyclohexane	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	98.188	213.69	1.609	-195.87	1.41778	503.4	570.20	0.0600	30
31		Ethene(Ethylene)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	-154.71	(1400)*	-272.48*	(1.228)*	731.0	48.54	0.0746	31
32		Propene(Propylene)	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.081	-53.83	232.8	-301.45*	1.3006*	676.6	198.31	0.0717	32
33		1-Butene(Butylene)	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	20.79	62.55	-301.63*	1.3386*	586.4	266.18	0.0683	33
34		cis-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	38.69	45.97	-218.01	1.3556*	615.4	324.31	0.0667	34
35		trans-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	33.58	49.88	-157.97	1.3487*	574.9	311.80	0.0679	35
36		Isobutene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	19.57	64.95	-220.60	1.3473*	580.2	292.49	0.0681	36
37		1-Pentene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.134	85.92	19.12	-265.37	1.36487	509.5	376.86	0.0674	37
38		1,2-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.092	51.52	36.53	-213.14	—	(656.)*	(354.)*	(0.070)*	38
39		1,3-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.092	24.06	59.46	-164.00	1.3975*	620.3	306.	0.0653	39
40		Isoprene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	68.119	93.29	16.68	-230.71	1.41472	(582.)*	(403.)*	(0.066)*	40
41		Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.038	-119.21*	—	-113.4*	—	890.4	95.29	0.0693	41
42		Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.114	176.13	3.225	41.96	1.49436	710.4	552.15	0.0531	42
43		Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.141	231.08	1.033	-138.96	1.49102	595.5	605.50	0.0549	43
44		Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.167	277.10	0.3716	-138.933	1.49022	523.0	651.22	0.0564	44
45		o-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.167	291.91	0.2643	-13.32	1.50017	541.6	674.85	0.0557	45
46		m-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.167	282.35	0.3265	-54.16	1.49177	512.9	650.95	0.0567	46
47		p-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.167	280.98	0.3424	55.87	1.49039	509.2	649.47	0.0572	47
48		Styrene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104.152	293.40	0.2582	-23.14	1.54937	587.8	(703.)*	0.0534	48
49		Isopropylbenzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.194	306.27	(0.188)	-140.838	1.48607	465.4	676.2	0.0569	49
50		Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> O	32.042	148.41	4.631	-143.77	1.32443	1174.	463.01	0.0590	50
51		Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	46.069	172.87	2.313	-173.4	1.35717	891.7	465.31	0.0581	51
52		Carbon monoxide	CO	28.010	-312.61	—	-336.99*	1.00028*	506.8	-220.51	0.0527	52
53		Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.010	-109.235*	—	-69.81*	1.00038*	1069.5	87.73	0.0342	53
54		Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	34.082	-76.49	394.67	-121.86*	1.00057*	1300.	212.40	0.0461	54
55		Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub>	64.065	14.11	85.46	-103.84*	1.00059*	1143.	315.7	0.0305	55
56		Ammonia	NH <sub>3</sub>	17.0305	-27.98	211.9	-107.85*	1.00033*	1647.	270.2	0.0681	56
57		Air	N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	28.9625	-317.81	—	—	1.00028*	546.9	-221.30	0.0517	57
58		Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.0159	-423.130*	—	-434.824*	1.00013*	187.5*	-420.3*	0.5101*	58
59		Oxygen	O <sub>2</sub>	31.9988	-297.317*	—	-361.826*	1.00027*	731.4	-181.41	0.0367	59
60		Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.0134	-320.436	—	-345.955*	1.00028*	492.8	-232.49	0.0510	60
61		Chlorine	Cl <sub>2</sub>	70.9054	-29.12	157.3	-149.70*	1.3735*	1157.	290.69	0.0280	61
62		Water	H <sub>2</sub> O	18.0153	211.953*	0.95014	32.018	1.33335	3200.1	705.11	0.04975	62
63		Helium	He	4.0026	-452.110	—	—	1.00003*	32.99	-450.31	0.2300	63
64		Hydrogen chloride	HCl	36.4606	-121.25	906.71	-173.50*	1.00039*	1205.	124.75	0.0356	64

# Annexe F : La viscosité $\mu_g$ du gaz à la pression et température d'intérêt.

