

N° Ordre...../Faculté/UMBB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE  
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**  
**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme :**

**MASTER**

Présenté par :

**MAROUF Bahaeddine**

Filière : génie des procédés.

Option : Raffinage.

**Thème :**

**Etude de l'impact de la durée de temps d'adsorption  
sur la section de déshydratation**

**Devant le jury :**

|                         |     |      |           |
|-------------------------|-----|------|-----------|
| M.                      | MCB | UMBB | Président |
| M.                      | MCB | UMBB | Examineur |
| M. BEN TAHAR Nourredine | MCB | UMBB | Encadrant |

Année Universitaire :2021/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE  
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



**Faculté des Hydrocarbures et de la  
Chimie**

**Département : Génie des procédés chimique et  
pharmaceutique.**

**Filière : Génie des procédés.**

**Option : Raffinage.**

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du diplôme :**

**MASTER**

**Thème :**

**Etude de l'impact de la durée de temps d'adsorption sur  
la section de déshydratation**

**Présenté par :**

MAROUF Bahaeddien

**Avis favorable de l'encadrant :**

**signature :**

**Avis favorable du président du jury :**

**Nom et Prénom**

**Cachet et signature**

## **Remerciement**

En premier lieu, je tiens à remercier Allah qui m'a donné la force pour accomplir ce travail,

J'adresse mes remerciements à Mon encadreur Monsieur N.BENTAHAR pour sa patience et ses conseils tout le long de la réalisation de ce travail ,

Je remercie mes parents pour avoir subvenu à mes besoins de manière inconditionnelle.

## Résumé

Afin de préparer mon mémoire, un thème m'a été attribué, qui est l'étude de l'impact de la diminution de la teneur en eau du GPL sur les paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge.

Pour optimiser énergétiquement l'unité de déshydratation, j'ai effectué un calcul des différentes quantités de chaleur de toute la section de déshydratation, après une étude du bilan massique de la colonne d'adsorption, en commençant par présenter les données du problème ainsi que la méthodologie poursuivie pour mener à bien nos calculs.

Un travail de vérification a été, aussi, effectué pour m'assurer de la validité de la méthode de calcul.

A la fin de cette étude, une proposition d'un programme de calcul pour la détermination des paramètres optimums de fonctionnement de déshydrateur de charge pour faire face au problème.

## **Abstract**

In order to prepare our thesis, we have been assigned a topic, which is the study of the impact of the decrease of the water content of LPG on the operating parameters of the dehydration section of charge.

In order to energetically optimize the dehydration unit, we performed a calculation of the different heat quantities of the whole dehydration section, after a study of the mass balance of the adsorption column, starting by presenting the data of the problem as well as the methodology pursued to perform our calculations.

A verification work was also carried out to ensure the validity of the calculation method.

At the end of our study, a proposal of a calculation program for the determination of the optimal parameters of operation of load dehydrator to face the problem.

# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| Introduction générale.....  | 1         |
| <b>Chapitre 1 Généralité sur le GPL .....</b>   | <b>3</b>  |
| Introduction .....  | 3         |
| 1.1 L'origine du GPL .....  | 3         |
| 1.2 Caractéristiques générales des GPL .....  | 5         |
| 1.3 L'utilisation des GPL .....   | 7         |
| <b>Chapitre 2 : Modes de Déshydratation et Tamis Moléculaires .....</b>               | <b>9</b>  |
| Introduction .....  | 9         |
| 2.1 Les Hydrates .....  | 9         |
| 2.2 Les modes de déshydratation .....   | 10        |
| 2.3 La zone de transfert de masse (ZMT) .....   | 10        |
| 2.4 Tamis moléculaires.....   | 13        |
| <b>Chapitre 3 : Présentation du complexe et section déshydratation de charge.....</b> | <b>19</b> |
| Introduction .....  | 19        |
| 3.1 Organisation du complexe .....  | 19        |
| 3.2 Situation .....   | 21        |
| 3.3 Principales installations .....   | 21        |
| 3.4 Capacité.....   | 21        |
| 3.5 Alimentation de l'usine .....   | 22        |
| 3.6 Les utilités .....  | 22        |
| 3.7 Procédé de fabrication .....  | 23        |
| 3.8 Section Déshydratation de Charge.....   | 27        |
| <b>Chapitre 4 : Présentation du problème et la méthode de calcul.....</b>             | <b>36</b> |
| 4.1 Présentation de problème .....  | 36        |
| 4.2 Méthode de calcul.....  | 37        |
| <b>Chapitre 5 : Validation de méthode .....</b>                                       | <b>42</b> |
| Introduction .....  | 42        |
| 5.1 Dimensionnement d'un déshydrateur .....   | 43        |
| 5.2 Calcul du bilan thermique .....   | 47        |
| 5.3 Calcul du bilan de matière de la régénération .....                               | 53        |
| 5.4 Récapitulation des résultats .....  | 57        |
| <b>Chapitre 6 : Etude de la solution optimale .....</b>                               | <b>58</b> |
| Introduction .....  | 58        |
| 6.2 Calcul du bilan thermique .....   | 60        |
| 6.3 Calcul du bilan de matière de la régénération .....                               | 62        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>6.4</b> | <b>Etude économique des résultats de la solution .....</b>         | <b>65</b> |
| <b>6.5</b> | <b>Interprétation et représentation graphique de l'étude .....</b> | <b>69</b> |
|            | <b>Conclusion générale .....</b>                                   | <b>75</b> |
|            | <b>Bibliographie.....</b>  | <b>76</b> |
|            | <b>Annexes .....</b>   | <b>77</b> |

# Table des matières

|  |    |
|--|----|
| Introduction générale :.....   | 1  |
| Chapitre 1 Généralité sur le GPL .....   | 3  |
| Introduction: .....  | 3  |
| 1.1 L'origine du GPL : .....   | 3  |
| 1.2 Caractéristiques générales des GPL : .....                                 | 5  |
| 1.3 L'utilisation des GPL :.....   | 7  |
| 1.3.1 Source de chauffage : .....  | 7  |
| 1.3.2 Climatisation : .....  | 7  |
| 1.3.3 Production d'énergie : .....   | 7  |
| 1.3.4 Le GPL dans la pétrochimie :.....  | 8  |
| 1.3.5 Le GPL dans L'agriculture :.....   | 8  |
| 1.3.6 Les risques liés au GPL :.....   | 8  |
| Chapitre 2 : Modes de Déshydratation et Tamis Moléculaires .....               | 9  |
| Introduction : .....   | 9  |
| 2.1 Les Hydrates.....  | 9  |
| 2.1.1 Les structures des hydrates :.....                                       | 9  |
| 2.1.2 Les conditions de formations d'hydrates .....                            | 10 |
| 2.2 Les modes de déshydratation .....  | 10 |
| 2.3 La zone de transfert de masse (ZMT) .....                                  | 10 |
| 2.3.1 Concept de la zone de transfert de masse .....                           | 12 |
| 2.4 Tamis moléculaires .....   | 13 |
| 2.4.1 Type et dimension du tamis .....   | 17 |
| 2.4.2 Régénération des tamis moléculaires .....                                | 17 |
| Chapitre 3 : Présentation du complexe et section déshydratation de charge..... | 19 |
| Introduction .....   | 19 |
| 3.1 Organisation du complexe :.....  | 19 |
| 3.2 Situation : .....  | 21 |
| 3.3 Principales installations :.....   | 21 |
| 3.4 Capacité :.....  | 21 |
| 3.5 Alimentation de l'usine : .....  | 22 |
| 3.6 Les utilités : .....   | 22 |
| 3.7 Procédé de fabrication :.....  | 23 |
| 3.7.1 Section déshydratation : .....   | 24 |
| 3.7.2 Section séparation :.....  | 24 |
| 3.7.3 Section réfrigération :.....   | 25 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| 3.7.4      | Section d'huile chaude : .....   | 26 |
| 3.7.5      | Section chargement par camion (CC) : .....   | 26 |
| 3.8        | Section Déshydratation de Charge .....   | 27 |
|            | Introduction : .....   | 27 |
| 3.8.1      | Description générale : .....   | 27 |
| 3.8.1.1    | Equipements Statiques : (Train-100).....   | 27 |
| 3.8.1.2    | Vanneries déshydrateur de charge : (Train 100) .....                               | 28 |
| 3.8.2      | Description interne du déshydrateur : .....  | 28 |
| 3.8.3      | Circuit GPL : .....  | 29 |
| 3.8.4      | Le cycle de régénération : .....   | 30 |
| 3.8.4.1    | Drainage : .....   | 30 |
| 3.8.4.2    | Dépressurisation : .....   | 31 |
| 3.8.4.3    | Chauffage : .....  | 32 |
| 3.8.4.4    | Refroidissement : .....  | 33 |
| 3.8.4.5    | Remise sous pression : .....   | 33 |
| 3.8.4.6    | Remplissage en liquide : .....   | 34 |
| Chapitre 4 | : Présentation du problème et la méthode de calcul .....                           | 36 |
| 4.1        | Présentation de problème : .....   | 36 |
| 4.1.1      | Interprétation de graphe : .....   | 37 |
| 4.2        | Méthode de calcul .....  | 37 |
|            | Introduction .....   | 37 |
| 4.2.1      | Constitution d'un déshydrateur de charge .....                                     | 38 |
| 4.2.2      | Bilan énergétique : .....  | 39 |
| 4.2.3      | Le bilan de matière de la régénération : .....                                     | 41 |
| Chapitre 5 | : Validation de méthode.....   | 42 |
|            | Introduction .....   | 42 |
| 5.1        | Dimensionnement d'un déshydrateur : .....  | 43 |
| 5.1.1      | Calcul de la quantité d'eau adsorbée : .....                                       | 43 |
| 5.1.2      | Calcul de la vitesse actuelle d'écoulement de fluide (Uact) : .....                | 44 |
| 5.1.3      | Calcul le débit d'eau : .....  | 44 |
| 5.1.4      | Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse : .....                      | 45 |
| 5.1.5      | Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre : .....                                | 45 |
| 5.1.6      | Estimation de la capacité d'adsorption à l'équilibre : .....                       | 45 |
| 5.1.7      | Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 kg de dessicant (X): ..... | 46 |
| 5.1.8      | Estimation de la quantité d'eau adsorbée M ads: .....                              | 46 |
| 5.1.9      | Calcul du temps d'adsorption : .....   | 46 |
| 5.1.10     | Détermination de l'efficacité d'adsorption : .....                                 | 46 |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| 5.2          | Calcul du bilan thermique .....   | 47 |
| 5.2.1        | Propriété du gaz de régénération .....  | 47 |
| 5.2.1.1      | La composition du gaz de régénération :.....                                      | 47 |
| 5.2.1.2      | Calcul de la masse volumique du GN dans les conditions normal $\rho_{GN}$ : ..... | 48 |
| 5.2.1.3      | Calcul de l'enthalpie de chauffage du gaz de 12.7°C à 280°C .....                 | 48 |
| 5.2.2        | Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q tamis.....         | 48 |
| 5.2.3        | Calcul de la température moyenne du lit en fin de chauffage .....                 | 49 |
| 5.2.4        | Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage de l'acier: .....             | 49 |
| 5.2.4.1      | Calcul du volume de l'acier (Vc).....   | 49 |
| 5.2.4.2      | Calcul de la masse de l'acier mc :.....   | 50 |
| 5.2.5        | Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Qdes: .....                       | 50 |
| 5.2.6        | Calcul des pertes de chaleur Qperte: .....  | 50 |
| 5.2.7        | Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Qtotale.....             | 51 |
| 5.2.8        | Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage Hf.....           | 51 |
| 5.2.9        | Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr » .....                              | 51 |
| 5.2.10       | Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle « $H_{f/cycle}$ » .....        | 52 |
| 5.2.11       | Calcul du temps de refroidissement du tamis « tref » : .....                      | 52 |
| 5.2.12       | Calcul de la chaleur soutirée au système Q ref:.....                              | 53 |
| 5.3          | Calcul du bilan de matière de la régénération .....                               | 53 |
| 5.3.1        | Calcul du débit du gaz de refroidissement : .....                                 | 53 |
| 5.3.2        | Calcul des pertes de charge: .....  | 53 |
| 5.3.2.1      | Calcul de la perte de charge $\Delta P/L1$ pour le GN chaud:.....                 | 53 |
| 5.3.2.2      | Calcul de la vitesse superficielle U1 à travers le lit:.....                      | 54 |
| 5.3.2.3      | Calcul de la viscosité du GN chaud $\mu_1$ : .....                                | 54 |
| 5.3.2.4      | Calcul de Re1: .....  | 55 |
| 5.3.2.5      | Calcul de la perte de charge $\Delta P/L2$ pour le GN froid.....                  | 55 |
| 5.3.2.6      | Calcul de la vitesse superficielle U2 à travers le lit.....                       | 56 |
| 5.3.2.7      | Calcul de la viscosité du GN froid $\mu_2$ .....                                  | 56 |
| 5.4          | Récapitulation des résultats : .....  | 57 |
| Chapitre 6   | : Etude de la solution optimale .....   | 58 |
| Introduction | .....   | 58 |
| 6.1.1        | Calcul le temps d'adsorption :.....   | 58 |
| 6.1.2        | Calcul le débit d'eau :.....  | 58 |
| 6.1.3        | Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse .....                       | 58 |
| 6.1.4        | Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre : .....                               | 58 |
| 6.1.5        | Estimation de la quantité d'eau adsorbée M ads : .....                            | 59 |
| 6.1.6        | Calcul du temps d'adsorption :.....   | 59 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 6.1.7   | Détermination de l'efficacité d'adsorption :.....   | 59 |
| 6.2     | Calcul du bilan thermique : .....   | 60 |
| 6.2.1   | Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption $Q_{des}$ : .....                                   | 60 |
| 6.2.2   | Calcul des pertes de chaleur $Q_{perte}$ : .....  | 60 |
| 6.2.3   | Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération $Q_{totale}$ :.....                        | 60 |
| 6.2.4   | Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage $H_f$ : .....                       | 60 |
| 6.2.5   | Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr » : .....  | 61 |
| 6.2.6   | Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle « $H_{f/cycle}$ »: .....                         | 61 |
| 6.2.7   | Calcul du temps de refroidissement du tamis « tref »: .....   | 61 |
| 6.2.8   | Calcul de la chaleur soutirée au système $Q_{ref}$ :.....   | 62 |
| 6.3     | Calcul du bilan de matière de la régénération : .....   | 62 |
| 6.3.1   | Calcul du débit du gaz de refroidissement : .....   | 62 |
| 6.3.2   | Calcul des pertes de charge: .....  | 62 |
| 6.3.2.1 | Calcul de la perte de charge $\Delta P/L1$ pour le GN chaud:.....                                   | 62 |
| 6.3.2.2 | Calcul de la viscosité du GN chaud $\mu_1$ : .....  | 63 |
| 6.3.2.3 | Calcul de $Re1$ : .....   | 63 |
| 6.3.3   | Calcul de la perte de charge $\Delta P/L2$ pour le GN froid : .....                                 | 63 |
| 6.3.3.1 | Calcul de la vitesse superficielle $U2$ à travers le lit :.....                                     | 63 |
| 6.3.3.2 | Calcul de la viscosité du GN froid $\mu_2$ :.....   | 64 |
| 6.3.3.3 | Calcul de $Re2$ : .....   | 64 |
| 6.3.4   | Interprétation des résultats :.....   | 64 |
| 6.4     | Etude économique des résultats de la solution :.....  | 65 |
| 6.4.1   | Gain en gaz naturel :.....  | 65 |
| 6.4.1.1 | Le nombre de cycle /an : .....  | 65 |
| 6.4.1.2 | Le nombre de cycle gagnés par an pour un train :.....   | 65 |
| 6.4.1.3 | Le gain en GN chaud pour un train par an : .....  | 66 |
| 6.4.1.4 | Le gain en GN froid pour un train par an :.....   | 66 |
| 6.4.1.5 | Le gain économique : .....  | 66 |
| 6.4.2   | Gain en vie du tamis moléculaire :.....   | 67 |
| 6.4.2.1 | Le coût de l'opération de changement du tamis moléculaire d'un déshydrateur<br>chaque année : ..... | 67 |
| 6.4.2.2 | la durée de vie du sécheur .....  | 68 |
| 6.4.2.3 | Le gain dans l'opération de changement du tamis moléculaire chaque année :.....                     | 68 |
| 6.4.2.4 | le gain annuel total pour le complexe.....  | 69 |
| 6.5     | Interprétation et représentation graphique de l'étude :.....  | 69 |
| 6.5.1   | Présentation des résultats d'étude.....   | 69 |
| 6.5.1.1 | Commentaires et interprétations :.....  | 71 |
| 6.5.2   | Présentation graphique des avantages de solution :.....   | 71 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 6.5.2.1 | Prolongation du temps d'adsorption :.....   | 71 |
| 6.5.2.2 | L'efficacité d'adsorption .....             | 72 |
| 6.5.2.3 | La chaleur fournie par le four .....        | 72 |
| 6.5.2.4 | La masse adsorbée par le déshydrateur ..... | 73 |
| 6.5.2.5 | Gain économique.....                        | 74 |
|         | Conclusion :.....                           | 74 |
|         | Conclusion générale .....                   | 75 |
|         | Bibliographie .....                         | 76 |
|         | Annexes.....                                | 77 |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1-1:Récupération des GPL à partir du pétrole brut. ....                           | 4  |
| Figure 1-2:Récupération du GPL à partir des champs de G.N.....                           | 4  |
| Figure 2-1: La zone ZMT se déplace lors de l'adsorption. ....                            | 11 |
| Figure 2-2: La courbe de percée.....   | 11 |
| Figure 2-3: Tamis moléculaire sous ses différentes formes .....                          | 13 |
| Figure 2-4: Tamis moléculaire 3A et 4A.....  | 14 |
| Figure 3-1 : organigramme du complexe .....  | 20 |
| Figure 3-2 : Schéma du procédé GPL.....  | 23 |
| Figure 3-3 : Schéma du procédé de liquéfaction du GPL .....                              | 24 |
| Figure 3-4 : Schéma de déshydrateur .....  | 29 |
| Figure 3-5: Séquence de drainage .....   | 31 |
| Figure 3-6 : Séquence de dépressurisation.....   | 31 |
| Figure 3-7 : Séquence de chauffage .....   | 32 |
| Figure 3-8 : séquence de refroidissement .....   | 33 |
| Figure 3-9 : Séquence de pressurisation.....   | 34 |
| Figure 3-10 : Séquence de remplissage.....   | 34 |
| Figure 3-11 : schéma de la section déshydratation.....                                   | 35 |
| Figure 4-1 : La variation de la teneur en eau durant les mois (janvier et février) ..... | 36 |
| Figure 6-1 : le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau .....                 | 71 |
| Figure 6-2 : Efficacité d'adoption en fonction de teneur en eau .....                    | 72 |
| Figure 6-3 : la chaleur fournie par le four en fonction de la masse d'eau adsorber.....  | 73 |
| Figure 6-4 la masse d'eau adsorbé en fonction de teneur d'eau.....                       | 73 |
| Figure 6-5 Gain en GN annuel en fonction de teneur en eau .....                          | 74 |

## Liste des tableaux

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tableau 1-1: Caractéristiques physico-chimiques du butane et du propane.....</b>    | <b>6</b>  |
| <b>Tableau 2-1: Diamètres de certaines molécules.....</b>                              | <b>16</b> |
| <b>Tableau 3-1: abréviations des départements .....</b>                                | <b>20</b> |
| <b>Tableau 3-2: Le cycle de régénération.....</b>                                      | <b>30</b> |
| <b>Tableau 4-1: La fiche technique du tamis moléculaire .....</b>                      | <b>38</b> |
| <b>Tableau 5-1 : La composition de la charge du GPL.....</b>                           | <b>42</b> |
| <b>Tableau 5-2 : La composition du gaz de régénération. ....</b>                       | <b>47</b> |
| <b>Tableau 5-3 : Représentation des données de réchauffage du tamis .....</b>          | <b>51</b> |
| <b>Tableau 5-4 :Représentation des valeurs de design et des valeurs calculées.....</b> | <b>57</b> |
| <b>Tableau 6-1 : résumé de résultat des calculs.....</b>                               | <b>70</b> |

# Introduction générale

---

## Introduction générale :

L'histoire de la civilisation est en grande partie l'histoire de la conquête de l'énergie par l'homme. Grâce à des techniques de plus en plus sophistiquées, l'homme a pu découvrir et exploiter, les unes après les autres, les caches où la nature avait stocké de l'énergie : gisements de charbon, de pétrole et de gaz.

Incontestablement, le pétrole et le gaz sont les ressources naturelles les plus importantes de notre pays.

Le gaz de pétrole liquéfié, connu sous le nom de GPL, est le défi actuel sur le marché mondial des carburants tels que le kérosène et le naphta.

Avant quelques années, l'énergie coûtait peu, l'industrie en général n'accordait pas une attention particulière à cette question. Mais ces dernières années, alors que le coût de cette énergie pèse de plus en plus sur le solde d'exploitation des entreprises, ces dernières se sont naturellement intéressées à ce poste qui a une part très importante dans le coût du produit fini.

Ainsi, peu à peu, il est apparu que dans les unités industrielles la fonction objective à maximiser n'est pas seulement le profil à court terme ou l'augmentation de la quantité de travail de production, mais aussi de rendre l'équipement fonctionnel dans sa juste mesure avec un maximum de performance.

Actuellement, on peut dire que pour l'entreprise, la consommation d'énergie est aussi importante que la sécurité, la pollution ou le contrôle qualité.

L'aspect économie d'énergie est justement l'une des préoccupations essentielles des exploitants du complexe GP1/Z.

L'objectif de nos travaux est d'optimiser le fonctionnement de la section de déshydratation de la cargaison, du fait qu'une surconsommation d'énergie a été constatée à ce dernier niveau.

Il faut essayer de trouver les sources de ce problème, analyser les causes et chercher des solutions, en dehors de toute perturbation du fonctionnement normal du complexe d'une part, et de l'investissement d'autre part.

Je présente d'abord une description du complexe GP1/Z. je détaille ci-dessous l'étude de la section de déshydratation de la cargaison.

## Introduction générale

---

Je cherche, dans une troisième partie, à localiser le problème de consommation excessive d'énergie, pour cela je procédons au calcul des différentes quantités de chaleur de l'ensemble de la section.

je étudie également le bilan de masse de cette colonne d'adsorption, en commençant par présenter les données du problème ainsi que la méthodologie suivie pour effectuer nos calculs.

Pour assurer la validité de la méthode de calcul, j'effectue d'abord les calculs pour un séchoir qui fonctionne comme prévu et confirmons les résultats obtenus avec la réalité.

je termine, en fin, cette étude en proposant un programme de calcul pour la détermination des paramètres optimums de fonctionnement de déshydrateur de charge.

# **Chapitre 1 Généralité sur le GPL**

## **Introduction:**

Le terme GPL ou gaz de pétrole liquéfié désigne un mélange d'hydrocarbures, qui sont gazeux aux conditions normales de température et de pression et qui ont la propriété de passer de l'état liquide par un abaissement de température ou de pression ou les deux à la fois. Il s'agit essentiellement de butane et de propane.

Cette propriété permet de stocker ( GPL produit fini ) dans un volume réduit (1m<sup>3</sup> de GPL liquide occupe un volume de 225 m<sup>3</sup> à l'état gazeux).

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est un mélange d'hydrocarbures légers stockés à l'état liquide et issus du raffinage du pétrole (40% des ressources mondiales) et plus généralement du traitement du gaz naturel (60% des ressources mondiales).

Le GPL était autrefois considéré comme un résidu de l'extraction du pétrole et directement brûlé au sommet de torches. Il est dorénavant récupéré par distillation, les fractions les plus nobles servent généralement de carburant pour véhicules en remplacement des essences plus chères et plus polluantes.

## **1.1 L'origine du GPL :**

Les gaz de pétrole liquéfiés sont obtenus principalement :

Dans les raffineries de pétrole, en cours de la distillation du pétrole brut. (Voir figure 1.1)

Au cours des opérations de dégazolinage du gaz naturel sur les champs de production, pour obtenir les produits condensables butane et propane. (Voir figure 1.2)

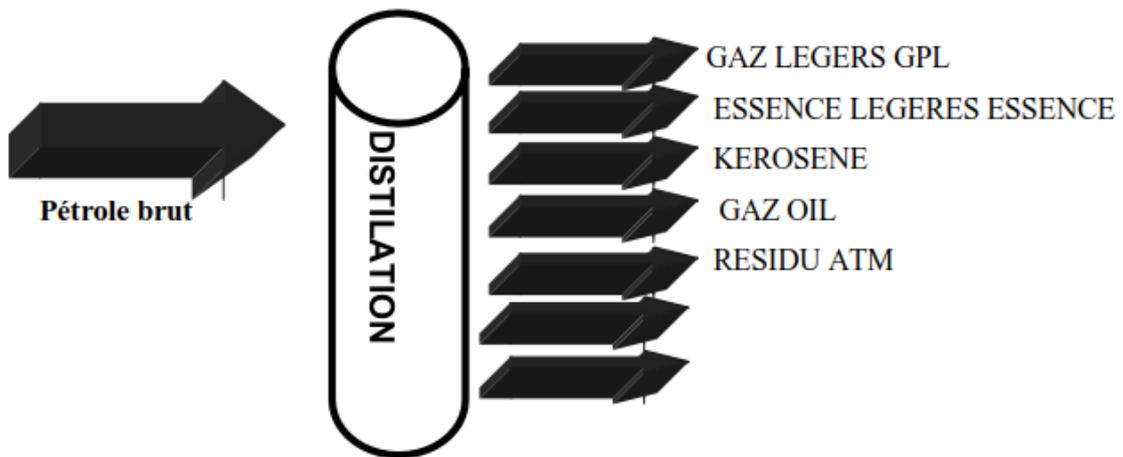


Figure 1-1: Récupération des GPL à partir du pétrole brut.

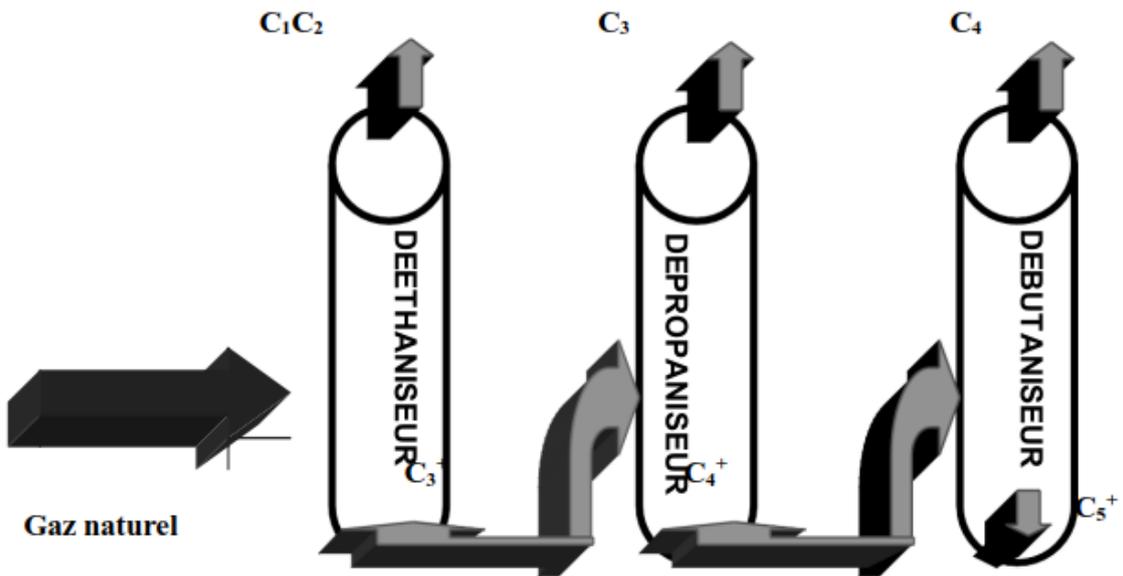


Figure 1-2: Récupération du GPL à partir des champs de G.N

## 1.2 Caractéristiques générales des GPL :

**Odeur :** le GPL est inodore à l'état naturel, mais on doit ajouter un odorant, ce sont des composés sulfures tel que le diéthylmercaptane ou le diméthylsulfide pour des raisons de sécurité.

**Tension de vapeur :** la TVR du GPL est de **8** et **2** bars pour le propane et le butane respectivement à **20°C**.

**Dilatation :** à l'état liquide, le GPL a un haut coefficient de dilatation dont il faut tenir compte lors de leur stockage (les sphères ne doivent jamais être complètement remplies).

**Densité :** aux conditions normales de température et pression, le GPL est plus lourd que l'air, sa densité diminue avec l'augmentation de la température

La densité est une spécification très importante pour la commercialisation du GPL.

**Température d'ébullition :** à la pression atmosphérique, la température d'ébullition du propane est de (**- 42°C**), et celle du butane est de (**- 6°C**).

**Pouvoir calorifique :** c'est la propriété la plus intéressante étant donné que le GPL est traditionnellement utilisé pour les besoins domestiques :

**Iso-butane** : PC = **29460** (kcal/kg).

**Normal butane:** PC = **29622** (kcal/kg).

**Propane** : PC = **22506** (kcal/ kg).

**Impuretés :** la teneur en soufre doit être, obligatoirement, inférieure ou égale à **0,005 %** en masse. L'eau est aussi considérée comme étant une impureté et sa teneur doit être réduite afin d'éviter le bouchage et la corrosion des conduites.

Le GPL n'a aucune propriété de lubrification et cet effet doit être prise en considération lors de la conception des équipements du GPL . Le GPL est incolore, que ce soit phase liquide ou gazeuse.

Le tableau ci-dessous récapitule quelques caractéristiques physico-chimiques du butane et du propane.

| Propriétés  | Propane | n-butane |
|---|---------|----------|
| Poids moléculaire (g/mol)   | 44,096  | 58,123   |
| Point de fusion (°C)  | -187,7  | -138     |
| Chaleur latente de fusion (kJ/kg)   | 94,98   | 80,165   |
| Masse volumique de la phase liquide à 1,013 bars au point d'ébullition (kg/m <sup>3</sup> ) | 582     | 601,4    |
| Point d'ébullition (1,013 bar) °C   | -42,1   | -0,5     |
| Chaleur latente de vaporisation (1,013 bar au point d'ébullition) kJ/kg                     | 425,31  | 385,6    |
| Pression de vapeur à 21 °C (bar)  | 8,7     | 1,2      |
| Température critique (°C)   | 96,6    | 152      |
| Pression critique (bar)   | 42,5    | 37,96    |
| Masse volumique du gaz à 1,013 bar au point d'ébullition (kg/m <sup>3</sup> )               | 2,423   | 2,7      |
| Facteur de compressibilité (z) à 1,013 bar et 15 °C   | 1,0193  | 0,9625   |
| Chaleur spécifique à pression constante (Cp) à 1 bar et 25 °C (kJ/mole. °K)                 | 0,075   | 0,096    |
| Chaleur spécifique à volume constant (Cv) à 1 bar et 25 °C (kJ/ mole °K)                    | 0,066   | 0,088    |
| Température d'auto-inflammation (°C)  | 470     | 365      |

Tableau 1-1: Caractéristiques physico-chimiques du butane et du propane.

## 1.3 L'utilisation des GPL :

Le GPL est utilisé dans de nombreux domaines, Parmi les principaux, on peut citer :

### 1.3.1 Source de chauffage :

L'apparition du gaz naturel, et le développement mondial rapide de son emploi, ont imposé une profonde mutation de l'industrie du gaz. Face à cette transformation, les constructeurs d'appareils domestiques ont en effet à résoudre d'importants problèmes techniques.

Ainsi ont été mis au point de nouveaux brûleurs adaptés spécifiquement à l'utilisation du GN et des GPL.

L'amélioration du service rendu, les aspirations de la clientèle, la recherche du meilleur rapport prix/qualité pour les produits ainsi que les contraintes inévitables de plus en plus importantes ont été aussi les principaux moteurs de cette évolution.

### 1.3.2 Climatisation :

Pour se vaporiser, les G.P.L. absorbent la chaleur de l'environnement et crée du froid. La quantité frigorifiée de prend de la quantité des G.P.L. vaporisées.

Un moteur fonctionnant aux G.P.L. peut entraîner un compresseur qui comprime un gaz (G.P.L.).

La détente absorbe de la chaleur et crée du froid.

### 1.3.3 Production d'énergie :

L'utilisation du GPL dans les centrales électriques en tant que source d'énergie se substitue à celle du charbon, des fuels etc...., et cela pour plusieurs raisons :

- Protection de l'environnement (produit pur).
- Diversification des combustibles pour éviter des coefficients de pointe trop importants ou pour augmenter l'indépendance énergétique de l'usine utilisatrice.

## 1.3.4 Le GPL dans la pétrochimie :

La demande pétrochimique globale du GPL enregistre un taux de croissance de l'ordre de **10%**

Il est utilisé comme charge pour le vapocraqueur à fin d'obtenir des oléfines.

Le butane et le propane sont obtenus dans la production du butadiène et du propylène considérés comme matière première pour la synthèse des caoutchoucs.

Le butane est aussi utilisé dans la fabrication de MTBE qui sert comme booster d'octane des essences. Il est ainsi utilisé comme charge pour les unités d'alcoylation. Le propane et le butane sont utilisés pour la production d'acétaldéhyde, formaldéhyde, l'acide acétique et l'acétone.

## 1.3.5 Le GPL dans L'agriculture :

L'utilisation du GPL dans ce secteur est orientée vers l'aviculture, et certaines cultures sous-serre, le niveau de consommation prévu est relativement faible (**40.000 tonnes/an**) pour le court terme, il est attendu une évolution plus significative à moyen et long terme particulièrement par l'introduction dans le domaine de l'élevage (éclairage, climatisation, chauffage ...etc.).

## 1.3.6 Les risques liés au GPL :

On cite quelques risques qui ont été signalés dans l'industrie gazière :

Les GPL sont fréquemment stockés à l'état liquide sous pression, la fuite du liquide peut, par évaporation rapide, donner un grand volume de gaz inflammable.

La limite inférieure d'inflammabilité du gaz approximativement à 2% du volume du gaz dans l'air. Une petite portion de gaz dans l'air peut donner un mélange inflammable qui peut être enflammé par un élément chaud ou une étincelle à distance d'un point de fuite.

L'évaporation des liquides de GPL peut causer des brûlures sévères, des vêtements de protection doivent être portés (gants, lunettes).

# **Chapitre 2 : Modes de Déshydratation et Tamis Moléculaires**

**Introduction :**

La présence d'eau entraîne différents problèmes pour l'exploitation, suivant les conditions de température et de pression qui règnent dans une installation ; la vapeur d'eau peut se condenser et provoquer la formation des hydrates, se solidifier ou favoriser la corrosion si le gaz contient des composants acides.

Pour éviter ces phénomènes, il est nécessaire de réduire la teneur en eau du gaz naturel au moyen de techniques de traitement appropriées.

La déshydratation du GPL est réalisée par différents types de procédés : absorption, adsorption etc. Je verrons dans ce qui suit la déshydratation par adsorption.

La déshydratation en phase liquide de la charge comprend deux colonnes d'adsorption fonctionnant en parallèle ; de manière alternée et périodique.

A tout instant, une colonne est en ligne pour l'adsorption et une deuxième est en train d'être régénérée. La durée d'adsorption est de 24 heures, mais elle était modifiée suivant les caractéristiques du GPL à l'entrée, elle est de 36 heures, à l'échéance de ce temps, la colonne en réserve est mise en service, et la colonne qui était en service passe en régénération.

L'écoulement à travers la colonne, pendant l'adsorption, se fait du bas vers le haut. Le fonctionnement de la section de déshydratation de l'alimentation est en continu, automatique et en séquence sous la commande d'un programmeur ; le contrôleur matriciel du cycle.

**2.1 Les Hydrates [9]**

Les hydrates sont des combinaisons physiques entre l'eau et les autres composés pour produire un solide qui a l'apparence d'un glaçon mais possédant une structure différente que celle d'un glaçon.

**2.1.1 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  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  et des grandes molécules tels que ( $\text{C}_3\text{H}_8$ , *i*-  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) qui ont la forme d'un diamant (structure II).

### 2.1.2 Les conditions de formations d'hydrates :[9]

Les conditions qui sont probatoires pour la formation d'hydrates sont :

#### a. Les conditions primaires :

- ❖ Le gaz doit être à ou au-dessous de son point de Rosée eau.
- ❖ La présence d'eau libre.
- ❖ Basse température.
- ❖ Haute pression

#### b. Les conditions secondaires :

- ❖ Vitesses élevées.
- ❖ L'introduction d'un petit cristal d'hydrate.

Un site physique pour la formation d'hydrates tels que : pipes, orifice.

## 2.2 Les modes de déshydratation :[6], [9]

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

- Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates.
- Déshydratation par absorption dans le liquide.
- Adsorption sur un agent desséchant solide activé.

## 2.3 La zone de transfert de masse (ZMT) :[1], [9]

L'adsorption est un phénomène de transfert de masse, et le transfert des molécules du fluide vecteur aux pores de l'adsorbant demande un temps fini. Ce temps est influencé par :

- La concentration (la quantité d'adsorbat devant être transférée).
- La présence de molécules concurrentes ou interférentes.
- L'ouverture des passages de diffusion (micropores) à l'intérieur des particules d'adsorbant, et la taille des pores actuels adsorbants.

La longueur du lit à travers laquelle un incrément de gaz passe pendant le transfert de n'importe quel composant de la phase gazeuse à la phase solide et appelée la zone de transfert de masse (ZMT). (Voir figure 2.1). En réalité, la ZMT est une zone précédée d'une zone dite d'équilibre.

La zone de transfert de masse est égale à 1/3 de la zone de saturation, il est également courant d'ajouter 0.3 à 0.6 m de desséchant au fond du lit qui agissent comme sécurité pour éviter de faire sortir le point de percée du lit. (Voir figure 2.2).

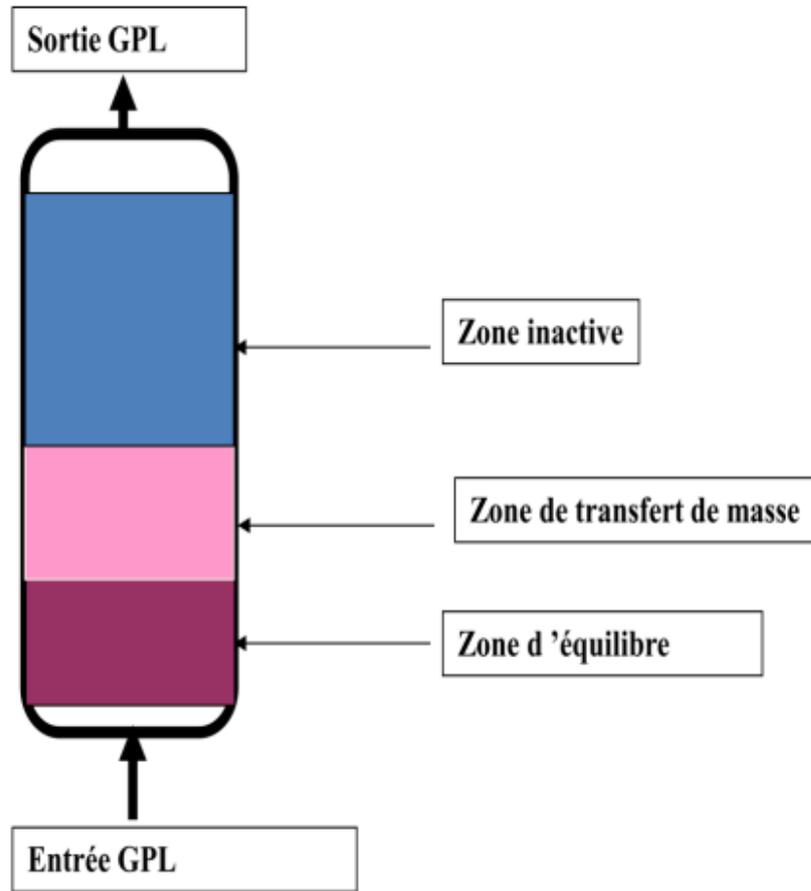


Figure 2-1: La zone ZMT se déplace lors de l'adsorption.

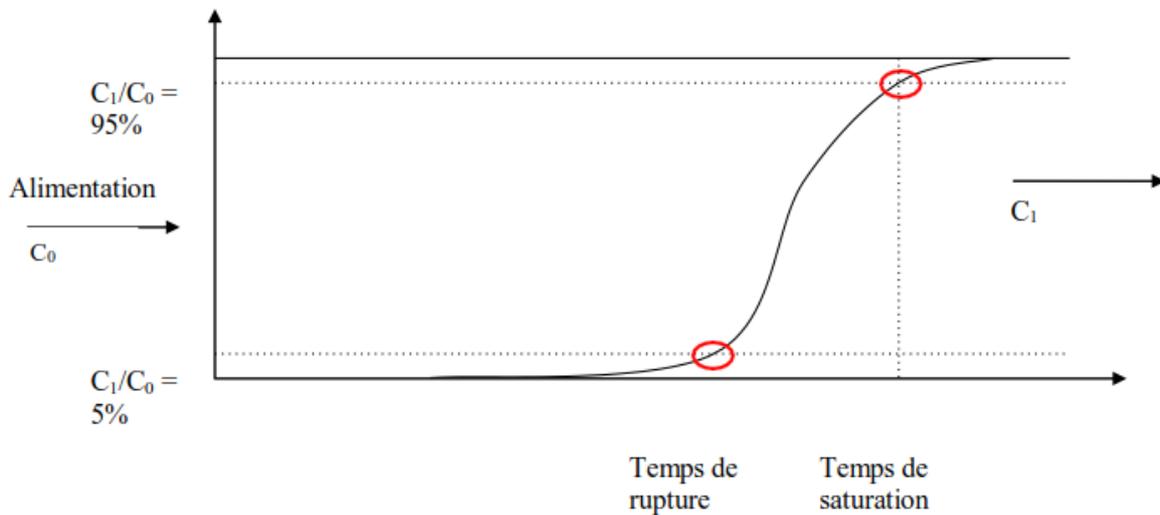


Figure 2-2: La courbe de percée.

Dans la pratique on limite le temps du cycle d'adsorption quand  $t_{\text{cycle}} = t_{\text{rupture}}$

La Z.M.T est une fonction de :

- La nature de l'adsorbant.
- Du débit d'alimentation.
- La nature ou de la composition du mélange à traiter.
- De la saturation relative du mélange en adsorbat.

### 2.3.1 Concept de la zone de transfert de masse [1] :

La zone de transfert de masse correspond à la longueur du lit nécessaire au phénomène d'adsorption, ou la concentration de l'adsorbat à la sortie varie en fonction de la concentration initiale.

En amont de la zone de transfert, l'adsorbant est saturé.

En aval. L'adsorbant est vierge ou régénéré, est prêt à travailler. L'importance de la zone de transfert de masse dépend principalement :

- De la cinétique d'adsorption de l'adsorbat.
- Des caractéristiques thermodynamiques du fluide.
- De la vitesse linéaire superficielle.
- Du type, de la forme et de la granulométrie du tamis moléculaire.

### Les adsorbants :

Il existe cinq agents desséchants importants utilisés qui sont :

Le silica gel, l'alumina gel, l'alumine activée, le charbon actif et le tamis moléculaire.

Tous ces agents desséchants fonctionnent par un phénomène qui n'est pas très bien compris, en effet tous les solides sont maintenus ensemble par une force de cohésion qui n'est pas équilibrée à la surface et une très faible attraction pour les molécules présentes dans un courant fluide similaire à une attraction magnétique ; forçant ces molécules à adhérer à une surface.

Il existe également deux autres phénomènes reliés dans l'adsorption de surface.

Les forces d'adsorption ont tendance à être concentrées au niveau où la surface en s'incurvant pour former un cylindre ou un pore.

Au fur et à mesure que le diamètre de ce pore se rapproche du diamètre de la molécule à adsorber les forces de condensation commencent à se concentrer.

### 2.4 Tamis moléculaires : (voir l'annexe B)

Les tamis moléculaires diffèrent des agents adsorbants traditionnels principalement par leur aptitude à adsorber des petites molécules tout en excluant de grandes molécules, si bien que des séparations peuvent être effectuées basées sur les différences de taille des molécules. (Voir l'annexe A et B).

Le tableau (2-1) donne les dimensions moléculaires qui doivent être utilisées comme guide lors du choix d'un type de tamis moléculaires pour une utilisation spécifique.

Les tamis moléculaires sont des adsorbants uniques et intéressants qui sont disponibles.

Les tamis moléculaires sont des aluminosilicates de métaux hydratés cristallins offrant un certain nombre de propriétés inhabituelles.



*Figure 2-3: Tamis moléculaire sous ses différentes formes*

Les types commerciaux importants de tamis moléculaires sont faits de matière synthétique mais leur structure est relativement similaire à certains minéraux naturels.

Les tamis moléculaires ou zéolithes utilisés en traitement de gaz sont des silicoaluminates dont la structure cristalline forme des cavités constituant un réseau micro poreux à l'échelle moléculaire. Cette structure comporte des cations qui ont un rôle de compensation de charge, selon leur nature, la taille des cavités d'accès varie.

Bien que les structures cristallines de certains tamis moléculaires soient quelque peu différentes, deux types A et X sont les plus connus et les plus importants (voir l'annexe A). Autant qu'agents adsorbants commerciaux.

## Chapitre 2 Modes de Déshydratation et Tamis Moléculaires

Ainsi pour les tamis de **structure A**, selon la nature du cation de compensation, la taille des cavités d'accès peut être de l'ordre de 3°A (tamis 3A), de 4°A (tamis 4A) ou de 5°A (tamis 5A). En sélectionnant un tamis de type 3A ou 4A, il est possible d'absorber l'eau au sein de la structure microporeuse tout en excluant les hydrocarbures.



*Figure 2-4: Tamis moléculaire 3A et 4A*

Les tamis moléculaires permettent d'obtenir des puretés du gaz traité élevées (teneur en eau de l'ordre de 1 ppm).

Au moment de sa formation, ce réseau cristallin est rempli d'eau mais par un chauffage modéré, l'humidité peut être éliminée des cavités sans modifier la structure cristalline.

Ceci laisse d'innombrables cavités, avec un volume de pores et une surface combinée énorme et régulière, disponible pour l'adsorption d'eau ou d'autres fluides.

Dans les conditions favorables, le procédé d'évacuation et de remplissage des cavités peut être répété de manière indéfinie.

Les tamis moléculaires sont des aluminosilicates de métal cristallin avec une structure d'interconnexion tridimensionnelle formée de tétraèdres d'alumine ou de silice, les tétraèdres sont formés par quatre atomes d'oxygène entourant un atome de silice ou d'aluminium.

Chaque atome d'oxygène a deux charges négatives et chaque atome de silice a quatre charges positives. Cette structure permet, grâce à une distribution des charges, de construire un tétraèdre qui peut être répété de manière uniforme dans quatre directions, du fait de la trivalence de l'aluminium, le tétraèdre d'alumine est chargé négativement, nécessitant un cation supplémentaire pour équilibrer le système.

Par conséquent, la structure finale possède des cations de sodium, de potassium ou de calcium dans le réseau. Ces cations « équilibrateurs de charges » constituent les ions échangeables de la structure d'une zéolite.

Dans la structure cristalline, jusqu'à la moitié des atomes de silice quadrivalents peuvent être remplacés par les atomes d'aluminium trivalents. En contrôlant les rapports des matériaux de départ, il est possible de produire des zéolites contenant différents rapports ion silice et ion aluminium et différentes structures cristallines contenant différents cations.

Les tamis moléculaires affichent un autre phénomène en plus de la condensation capillaire. Ces tamis sont des matériaux cristallins ayant des atomes chargés positivement et négativement, rigidement fixés en position.

Ceci résulte d'une distribution inégale des charges et crée une surface polaire cette dernière exerce une attraction électrostatique. Sur les molécules polaires telle que l'eau.

Par conséquent, les tamis moléculaires utilisent deux mécanismes d'adsorption, raison pour laquelle les tamis moléculaires sont des adsorbants bien plus puissants que le silicagel ou l'alumine.

Les tamis moléculaires, ayant des propriétés constantes : tels que les données d'équilibre qui se représentent sous forme d'une isotherme, représentent une relation d'équilibre existant entre le fluide et le solide.

La concentration de l'adsorbant, l'eau, est une fonction à la fois de la concentration de l'eau dans la phase fluide (pression partielle) et la température d'adsorption.

Les tamis moléculaires sont également caractérisés par leur capacité d'adsorption relativement élevée aux faibles concentrations du matériau absorbé.

Les caractéristiques principales d'un tel procédé sont les suivantes :

- La concentration en H<sub>2</sub>O doit être faible ;
- Il est peu recommandé pour les grands débits de charge ;
- Le pourcentage résiduel d'eau est très faible ;
- Il nécessite un fonctionnement discontinu ;
- La présence de COS et CS<sub>2</sub> est nuisible ;
- L'adsorbant est un produit cher et doit être remplacé tous les 3 ans.

| 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                    |

*Tableau 2-1: Diamètres de certaines molécules.*

### 2.4.1 Type et dimension du tamis :

Le tamis moléculaire utilisé pour la déshydratation du GPL est de type 4°A. Ce dessiccant adsorbe les molécules ayant un diamètre effectif inférieur à 4°A y compris H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, l'éthane et les hydrocarbures les plus légères, en excluant toutes les molécules ayant un diamètre effectif supérieur à 4°A.

Les usines de GPL préfèrent utiliser des granulés, car les granulés de petits diamètres offrent une surface plus importante par unité de volume pour le transfert de masse.

### 2.4.2 Régénération des tamis moléculaires

Le phénomène d'adsorption se traduit à l'équilibre par un état de saturation, le tamis moléculaire saturé n'adsorbe plus.

Trois méthodes sont utilisées pour absorber les produits adsorbés. Une diminution de la quantité adsorbée à l'équilibre peut être obtenue, soit en augmentant la température, soit en diminuant la pression partielle de l'adsorbât, ou encore par une combinaison des deux moyens.

#### a- Augmentation de la température

Elle est généralement effectuée en balayant le lit avec un gaz préchauffé. Dans la plupart des cas, l'effet d'augmentation de la température est amplifié par l'effet de diminution de la pression partielle.

Les performances souhaitées, la teneur en eau du gaz de purge, la nature de l'adsorbât et les impuretés coadsorbées déterminent la température à quel doit s'effectuer la régénération thermique. Très souvent celle-ci se situe entre 200 et 300°C.

- La quantité de chaleur à fournir pour obtenir une régénération convenable est égale à la somme des quantités de chaleur suivantes :
- La chaleur nécessaire au chauffage du lit d'adsorbant ;
- La chaleur nécessaire au chauffage de l'adsorbent (fonction de la nature de calorifuge);
- La chaleur nécessaire au chauffage et la désorption de la masse d'adsorbât retenue dans le lit ;
- Les pertes thermiques à travers les parois de la colonne d'adsorption.

## Chapitre 2                    Modes de Déshydratation et Tamis Moléculaires

---

Des molécules organiques (oléfines, aromatiques, paraffines lourdes etc....) Présentes dans le fluide à traiter peuvent être adsorbées durant la phase d'adsorption. Pour éviter ou minimiser les risques de cokage pendant la régénération thermique, en effectuant, éventuellement une purge avec un gaz inerte. La phase de chauffage est suivie par une étape de refroidissement qui ramène le lit à la température d'adsorption.

### **b- Diminution par variation de pression**

La régénération par variation de pression est basée sur la réduction de la capacité d'adsorption, dû à la réduction de la pression partielle de l'adsorbât.

# **Chapitre 3 :Présentation du complexe et section déshydratation de charge**

## Introduction

Important complexe, construit dans la zone industrielle d'ARZEW dans le but de traiter le mélange brut GPL, afin de produire du propane commercial et du butane commercial.

- Le contrat de construction passé avec « IHI-C-ITOH JAPON » le 11 Décembre 1978.
- L'ouverture du chantier le 10 Octobre 1980.
- L'inauguration officielle le 31 Décembre 1983.
- Le chargement du premier navire de propane réfrigéré le 20 Février 1984.
- L'extension du complexe :
  - o Phase II le 24 Février 1998 (deux trains)
  - o Phase III le 24 Février 2010 (trois trains)

### 3.1 Organisation du complexe :

L'organisation du complexe GP1/Z est étudiée de façon à avoir une coordination complète entre les différentes structures de l'usine afin de permettre une exploitation optimale des ressources disponibles. Le suivi est assuré par quatre équipes dont une au repos ainsi que par le personnel de maintien travaillant en journées normales. (Voir figure 3.1).

## Chapitre 3 Présentation du complexe et section déshydratation de charge

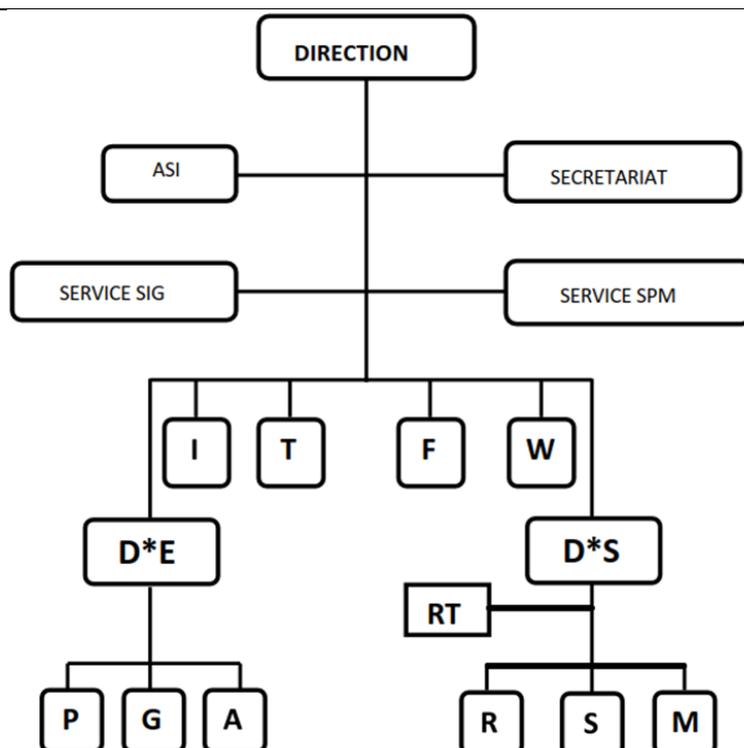


Figure 3-1 : organigramme du complexe

|            |   |
|------------|---|
| <b>D</b>   | <b>La Direction</b>                         |
| <b>T</b>   | <b>Département Technique</b>                |
| <b>SIG</b> | <b>Service Informatique et Organisation</b> |
| <b>I</b>   | <b>Département Sécurité</b>                 |
| <b>F</b>   | <b>Département Finance et Juridique</b>     |
| <b>SPM</b> | <b>Section passation des marchés</b>        |
| <b>W</b>   | <b>Département Travaux neufs</b>            |
| <b>D*E</b> | <b>Sous-Direction d'Exploitation</b>        |
| <b>D*S</b> | <b>Sous-Direction du personnel</b>          |
| <b>P</b>   | <b>Département Production</b>               |
| <b>RT</b>  | <b>Relation de Travail</b>                  |
| <b>G</b>   | <b>Département Maintenance</b>              |
| <b>R</b>   | <b>Département Ressources Humaines</b>      |
| <b>S</b>   | <b>Administration et social</b>             |
| <b>A</b>   | <b>Département Approvisionnement</b>        |
| <b>ASI</b> | <b>Assistance sûreté interne</b>            |
| <b>M</b>   | <b>Département moyens généraux</b>          |

Tableau 3-1: abréviations des départements

## Chapitre 3 Présentation du complexe et section déshydratation de charge

---

### 3.2 Situation :

D'une superficie de 120 hectares, le complexe GP1.Z est situé dans la zone industrielle d'ARZEW, entre la centrale thermique (MERS EL HADJAJ) à l'EST et le complexe GNL3.Z à l'OUEST, entre la mer méditerranée et la route nationale N°11

### 3.3 Principales installations :

- 22 Sphères de stockage de la charge d'alimentation de 1000 m<sup>3</sup> chacune.
- 09 Trains de traitement du GPL.
- 03 Unités de reliquéfaction du gaz évaporé.
- 04 Bacs de stockage de propane basse température de 70000 m<sup>3</sup> chacun.
- 04 Bacs de stockage de butane basse température de 70000 m<sup>3</sup> chacun.
- 04 Sphères de stockage de produits à température ambiante (propane et Butane) de 500 m<sup>3</sup> chacune.
- 01 Sphère de stockage gazoline.
- 05 Salles de contrôle.
- 02 Stations électriques alimentent par la SONELGAZ.
- 06 Générateurs assurant l'énergie de secours du complexe en cas de coupure de courant.
- 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 pour le réseau d'incendie.
- Un système de télésurveillance.

### 3.4 Capacité :

A partir d'un traitement du GPL brut Algérien en provenance des champs gaziers et pétroliers du sud, la production du complexe est de 10.800.000 tonne/an de GPL : propane, butane commerciaux et pentane.

## 3.5 Alimentation de l'usine :

### Les sources d'alimentation :

L'usine reçoit son alimentation de GPL des sources suivantes : Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Alrar, In amenas, Tin Fouye Tabankort (TFT) Rhourde Nouss, Gassi Touil.

## 3.6 Les utilités :

Elle alimente les diverses zones de production en :

- Fuel (gaz naturel) : utilisé comme combustible.
- Air : elle est divisée en deux :
  - ✓ Air instrument : C'est de l'air séché après enlèvement de l'humidité, cet air aide pour ouvrir les vannes et la manipulation des boucles de régulation (vanne pneumatique).
  - ✓ Air service : C'est de l'air qui sert pour le nettoyage et l'entretien.
- Vapeur : L'eau distillée vien de KAHRAMA et à partir de la chaudière on produit de la vapeur.
- Eau :
  - ✓ L'eau distillée.
  - ✓ L'eau de refroidissement.
  - ✓ L'eau potable.
- Méthanol : Il est utilisé pour le dégivrage.
- Gasoil : Il est utilisé pour les générateurs de secours.
- Azote : Ballon d'azote, il y'a deux circuits
  - ✓ Circuit Gazeuse (HELIOS).
  - ✓ Circuit l'azote liquide (COGIZ) : On le transforme en vapeur pour l'inertage des équipements.
- Un générateur électrique de secours d'une capacité de 25.617 Kw.
- Un système de sécurité vide-vite (blow-down).

Les torches : trois hautes pressions et deux basses pressions servent à brûler la quantité de gaz provoquée par un dysfonctionnement des trains.

# Chapitre 3 Présentation du complexe et section déshydratation de charge

## 3.7 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 parallèle.

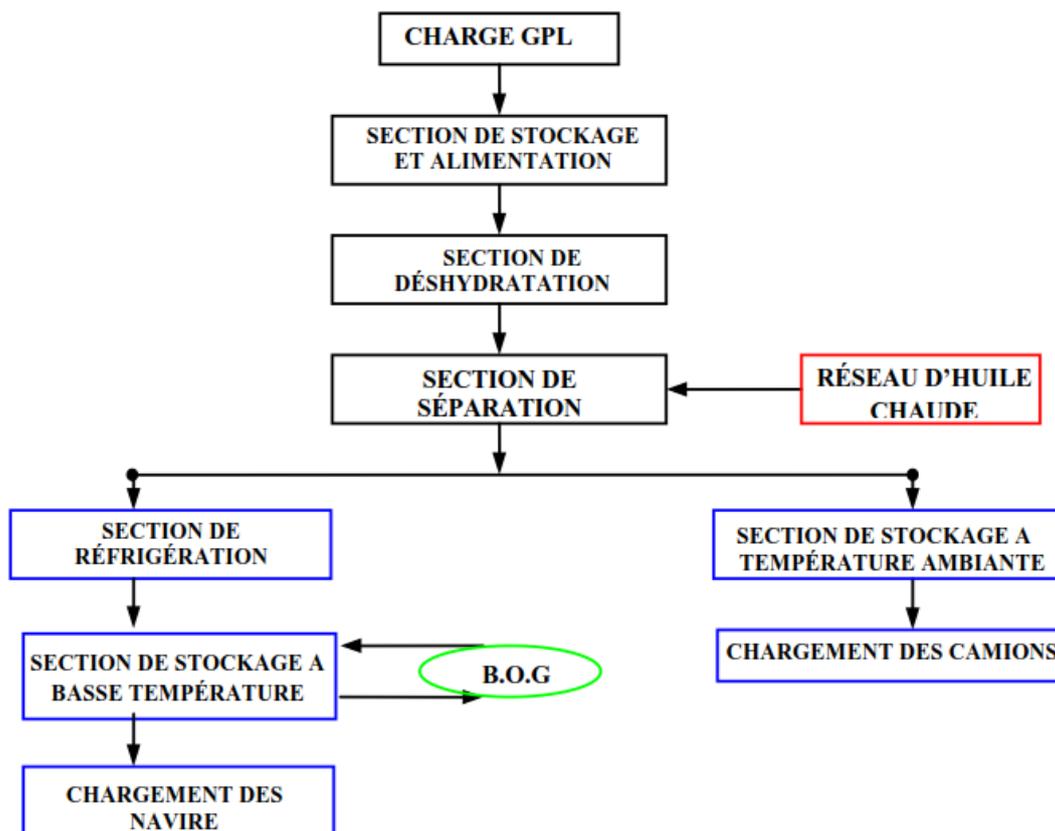


Figure 3-2 : Schéma du procédé GPL

# Chapitre 3 Présentation du complexe et section déshydratation de charge

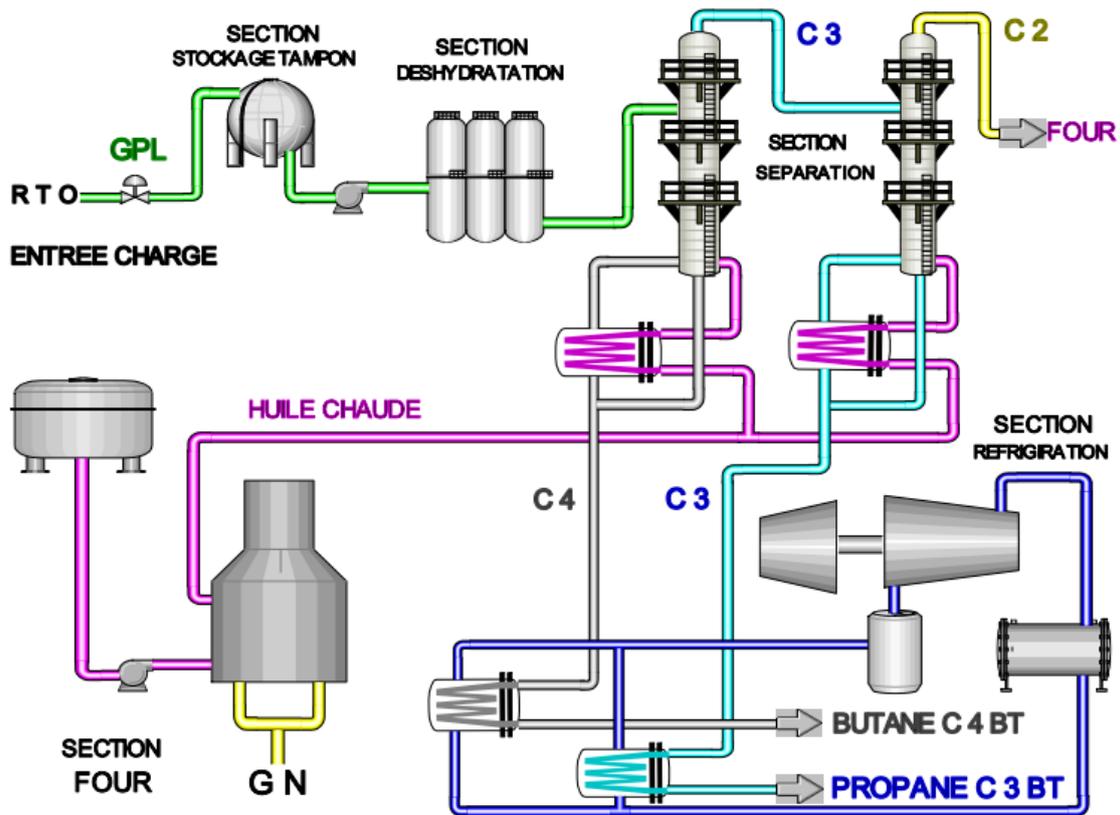


Figure 3-3 : Schéma du procédé de liquéfaction du GPL

Chaque train est conçu de manière à produire 1.200.000 de tonnes/an et comprend les sections suivantes :

### 3.7.1 Section déshydratation :

Le but de cette section est de réduire la teneur en eau de 100 ppm à 5 ppm dans le déshydrateur de charge et de 5 ppm à environ 1 ppm dans le déshydrateur de garde (dans la section réfrigération) et cela pour éviter la formation du givre dans les équipements en aval.

### 3.7.2 Section séparation :

Le GPL provenant de la section déshydratation est introduit dans le fractionnateur à un débit nécessaire de telle manière à obtenir la quantité requise de produits.

#### - Passage par les préchauffeurs :

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

## Chapitre 3 Présentation du complexe et section déshydratation de charge

---

### - **Fractionnateur :**

C'est une colonne de fractionnement équipée de 55 plateaux à clapets. C'est dans cette colonne que l'on effectue la récupération de l'Éthane et du Propane en tête, tandis que le butane et le pentane seront récupérés en fond. Le produit de tête du fractionnateur est envoyé vers le dé-éthaniseur au moyen d'une pompe de reflux qui assure en même temps la charge de dé-éthaniseur et le reflux du fractionnateur. Le butane sortant du fond est dirigé vers la section de réfrigération.

### - **Dé-éthaniseur :**

C'est une colonne de fractionnement équipée de 25 plateaux à clapets. Cette colonne est utilisée pour l'élimination de l'éthane contenu dans le propane, l'éthane sort en tête et le propane sort au fond de la colonne.

### - **Dépentaniseur :**

C'est une colonne de fractionnement équipée de 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%.

Il existe deux dépentaniseurs pour les neuf trains.

### **3.7.3 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 lancer le refroidissement, les vannes 5 et 9 s'ouvrent et TS-2 est mis en service. Les vannes 7A et 10A restent ouvertes après la séquence de chauffage et E-1001 reste en service.

Le flux du gaz froid entrant dans le lit est maintenu par un contrôleur de débit. Le refroidissement demande 5 heures et sa fin est signalée par TS-2 qui indique que le dessus du lit s'est suffisamment refroidi (45 °C).

Le gaz utilisé pendant la séquence de refroidissement continue à s'écouler vers le réseau de fuel gaz. Après le refroidissement, les vannes du lit 9, 7A et 5 se ferment et TS2 est mis hors service.

## Chapitre 3      Présentation du complexe et section déshydratation de charge

---

### 3.7.4 Section d'huile chaude :

La section du fluide caloporteur est utilisée comme source de chaleur pour les rebouilleurs des colonnes de fractionnement et pour le préchauffeur final de la charge.

Le fluide caloporteur circulant dans la boucle est l'huile TORADA TC 32.

La température du fluide caloporteur à la sortie du four représente la température d'entrée pour chaque utilisation, est maintenue à 180°C.

Le four (H-X501) fournit également la chaleur nécessaire au gaz naturel pour la régénération des tamis moléculaire de la section déshydratation tout en chauffant ce dernier dans un petit serpentin de la section de convection à une température constante de 280°C à un débit de 2000 Nm<sup>3</sup>/h.

#### 3.7.1 Section de stockage des produits :

Il existe deux types de stockage :

##### **a-Stockage à température ambiante :**

Prévu pour la commercialisation du gaz à l'échelle nationale ; le chargement camions se fait à partir des 4 sphères ayant une capacité de 500 m<sup>3</sup> chacune dans lesquelles sont stockés le propane et le butane sous pression.

##### **b-Stockage à basses températures :**

Les gaz réfrigérés (propane butane) sont véhiculés aux bacs où ils seront stockés dans les conditions de basse température sachant que la capacité de chacun est 70.000 m<sup>3</sup> et sont munis de pompes immergées pour la circulation du gaz et le chargement navires.

**BOG (Boil- Off- Gas) :** S'occupe de la gestion des bacs (produits finis).

#### 3.7.5 Section chargement par camion (CC) :

S'occupe de la gestion des enlèvements par camion au niveau de la rampe de chargement par camion (client NAFTAL et les opérateurs privés). Grâce au système de contrôle distribué (DCS) à travers tout le complexe, on peut visualiser et avoir tous les renseignements.

## 3.8 Section Déshydratation de Charge

### Introduction :

La déshydratation est effectuée sur la charge en provenance des différents champs afin d'éliminer l'eau dissout dans le GPL brut pour préserver nos équipements en Aval et éviter ainsi toute perturbation qui peut être causée par la présence de givrage et/ou formation d'hydrates au niveau des circuits et des Instruments.

Chaque train possède une section de déshydratation de la charge pour réduire la teneur en eau dissout dans le GPL d'une quantité maximale de **100 ppm** à une valeur de moins de **5 ppm**.

La section déshydratation de charge comprend trois colonnes d'adsorption, constituées de tamis moléculaire et fonctionnant en parallèle.

A tous instant, une colonne est en ligne pour l'adsorption, une deuxième en régénération, tandis que la troisième est en réserve.

La durée d'adsorption est de **36 heures**, à l'expiration de ce temps, la colonne en réserve est mise en ligne, et la colonne qui était en service passe en régénération.

A ce moment-là, la troisième colonne a achevé son cycle de régénération et passe en réserve.

Pendant l'adsorption, l'écoulement à travers la colonne se fait du bas vers le haut. Il faut aussi noter que la section déshydratation de la charge peut travailler sur seulement deux adsorbants, si bien qu'une colonne peut être révisée, pendant que les deux autres assurent l'adsorption de la charge.

### 3.8.1 Description générale :

#### 3.8.1.1 Equipements Statiques : (Train-100).

L'unité de déshydratation de charge a été conçue pour sécher le produit de GPL à une teneur d'eau de 100 à 5 ppm. Elle est composée par des équipements suivants :

- Panneau Local 02-M-1001.
- Sécheurs 02-V-1001A/B/C.
- Séparateur démister 02-V-1002.
- Aéros refroidisseurs 02-E-1001 A/B.
- Réservoir (Tampon) d'Air Instrument 02-V-1020.

## Chapitre 3 Présentation du complexe et section déshydratation de charge

---

- Analyseur 02-AI-1001.

Filtres 02-M-1020A/B « entrée charge », 02-M-1021A/B « sortie charge ».

### 3.8.1.2 Vanneries déshydrateur de charge : (Train 100)

#### a-Vannes individuelles :

- SWV. 1001 (A/B/C) : Entrée GPL ligne 8".
- SWV. 1002 (A/B/C) : Sortie GPL ligne 8".
- SWV. 1003 (A/B/C) : Purge du GPL ligne 1,5".
- SWV. 1004 (A/B/C) : Entrée Gaz de Purge 1,5".
- SWV. 1007 (A/B/C) : Sortie Gaz de Réchauffage et Entrée Gaz de refroidissement 4".
- SWV. 1010 (A/B/C) : Entée Gaz de Réchauffage et Sortie Gaz de refroidissement 4".
- SWV. 1012 (A/B/C) : Entrée GPL pour remplissage du déshydrateur 1,5".

#### b-Vannes communes :

- SWV-1005 : Sortie du Gaz de Refroidissement ligne 4".
- SWV-1006 : Entée Gaz de Réchauffage ligne 4".
- SWV-1008 : Sortie Gaz de Réchauffage ligne 4".
- SWV-1009 : Entrée Gaz de Refroidissement ligne 3".
- SWV-1011 : Dépressurisation ligne 1,5".
- SWV-1013 : Sortie Gaz de Purge ligne 1,5".
- PV-1001 : vanne de contrôle de pression du séparateur
- PV-1004 : vanne de contrôle de pression d'H2O de charge.

### 3.8.2 Description interne du déshydrateur :

- Une conduite d'entrée (en bas du déshydrateur) pourvue d'un Répartiteur de charge GPL.
- Une grille avec matelas à maille de 4 mesh et un autre de 20 mesh supportant deux couches de billes céramiques de diamètre de (1/2" et 1/4").
- Une charge d'Alumine Active.
- Un matelas (en haut à mailles de 20 mesh) supportant une autre couche de billes céramiques de diamètre (1/2").
- Un matelas à mailles de 20 mesh couvrant les billes céramiques d'en Haut.
- Un Filtre Empêchant l'entraînement d'Alumine.
- Une conduite de Sortie (pour l'alimentation du Fractionnateur).

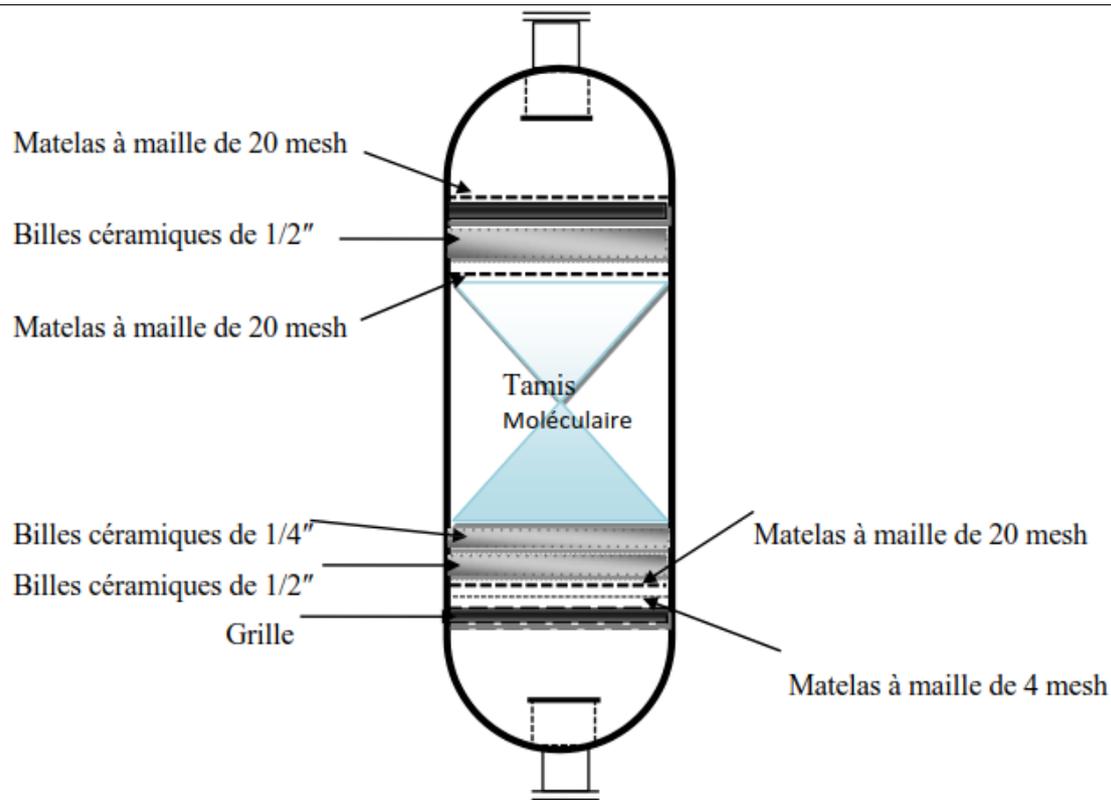


Figure 3-4 : Schéma de déshydrateur

### 3.8.3 Circuit GPL :

Le GPL brut provenant de la section des sphères d'alimentation est transféré par des pompes de charge (**P-0011**) jusqu'aux trains de procédé.

Il passe d'abord par un élément de mesure de densité (Densimètre) à l'entrée du train 100, du train 500 et du train 700 puis par une vanne de sécurité (**XV-N001**) ensuite par un clapet anti-retour et un transmetteur de débit (**FT**) branché avec le (**DT**) afin de maintenir un contrôle de débit stable à l'entrée de la colonne du (**Fractionnateur**) par le (**FIC-N002**).

Le GPL passe ensuite par un analyseur d'eau en ligne avant de pénétrer dans les filtres d'entrée charge (**M-N020A/B**) ces filtres sont équipés par **PDG-(N006)** pour signaler l'encrassement  $\Delta P = 0.4 \text{ Kg/cm}^2$ .

Enfin le GPL pénètre dans la section de déshydratation par la (**SWV-N001**) pour subir l'opération de déshydratation dans le Sécheur aligné (en service).

À la sortie des sécheurs par la (**SWV-N002**) le GPL déshydraté est filtré une autre fois dans les filtres de sortie (**M-N021A/B**) munis d'un (**PDG-N004**) :  $\Delta P = 0.4 \text{ Kg/cm}^2$ .

## Chapitre 3 Présentation du complexe et section déshydratation de charge

Le (PDSH-N007) est installé entre la ligne d'entrée charge et la sortie vers séparation afin de signaler la différence de pression haute par une apparition d'alarme commune  $\Delta P = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ . Après une durée bien déterminée et régulée par minuterie appelée **(TIMER)** ; le tamis moléculaire saturé du sécheur qui était en adsorption doit être soumis à une régénération afin d'être réutiliser.

Entre temps et chronologiquement le sécheur suivant (en stand-by) se met automatiquement en service.

### 3.8.4 Le cycle de régénération :

Le cycle de régénération comprend les pas qui représenté sur le tableau 3.2 :

| Etapes           | Temps (hr) | P (Kg/cm <sup>2</sup> ) | T (°C) |
|------------------|------------|-------------------------|--------|
| Drainage         | 1          | 20                      | 30     |
| Dépressurisation | 0,5        | 4,5                     | 30     |
| Réchauffage      | 11         | 4,5                     | 280    |
| Refroidissement  | 5          | 4,5                     | 12,7   |
| Pressurisation   | 0,5        | 20                      | 45     |
| Remplissage      | 1          | 30                      | 30     |

Tableau 3-2: Le cycle de régénération

#### 3.8.4.1 Drainage :

Dès que V-1001B est mis en ligne, la vanne 2A se ferme. Après la fermeture de cette vanne, la séquence de régénération commence avec le drainage du GPL restant dans la colonne d'adsorption. Le GPL brut est évacué vers les réservoirs sphériques d'alimentation sous la pression du gaz naturel ( $20 \text{ kg/cm}^2$ ) eff introduit en haut de la colonne, Les vannes 3A et 4A s'ouvrent pour refouler le GPL vers les réservoirs sphériques d'alimentation, à l'état liquide. A ce moment, LS-1, un contact de niveau est mis enservice.

Lorsque le niveau liquide atteint LS-1, la vanne 3A et ensuite la vanne 4A se ferment.

L'opération de drainage est alors terminée et LS-1 est mis hors service. Le temps prévu pour le drainage est d'environ une heure.

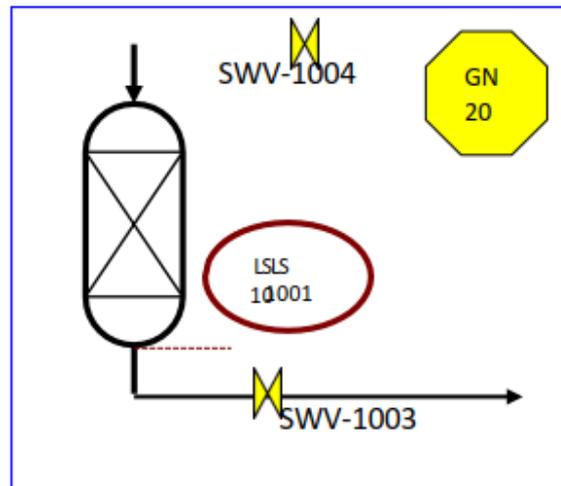


Figure 3-5: Séquence de drainage

### 3.8.4.2 Dépressurisation :

Après drainage complet de la colonne d'adsorption, la pression dans V-1001 A est de 20 kg/cm<sup>2</sup> eff. Avant de pouvoir commencer la séquence de chauffage, il faut que cette pression soit réduite à 4,5 kg/cm<sup>2</sup> eff.

Lorsque les vannes 3A et 4A sont en position fermée, la commande automatique chronologique ouvre d'abord la vanne 11 et ensuite la vanne 7A, et met le contact de la pression différentielle, PDS-2 en service. V-1001A est alors dépressurisé lentement vers le réseau de fuel gaz.

Lorsque PDS-2 signale un débit zéro, la vanne 11 se ferme automatiquement la vanne 7A reste ouverte. La pression dans la colonne est alors de 4,5 kg/cm<sup>2</sup>. La dépressurisation demande environ une demi-heure.

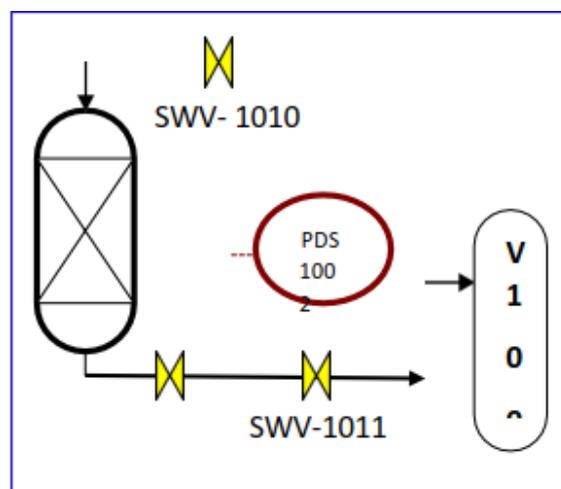


Figure 3-6 : Séquence de dépressurisation

## Chapitre 3 Présentation du complexe et section déshydratation de charge

### 3.8.4.3 Chauffage :

La séquence de chauffage représente l'opération principale de la séquence de régénération, puisque l'eau adsorbée est complètement chassée des tamis moléculaires pendant cette opération.

Le lit du tamis moléculaire est chauffé du haut vers le bas, en se servant du gaz naturel chaud, qui a été porté à 280°C dans le four de fluide caloporteur.

Pour lancer la séquence de chauffage, on ouvre les vannes 8,6 et 10A. Le contrôleur du débit dans la canalisation du gaz chaud introduit un débit constant de gaz dans le lit, qui s'échauffe lentement, pour chasser l'eau entraînée.

L'aéroréfrigérant E-1001 est mis en service pour refroidir le gaz sortant du lit et pour 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 sous contrôle du niveau, vers les égouts des eaux huileuses.

Le gaz refroidi passe en tête vers le réseau de fuel gaz. Le condensat d'hydrocarbure qui se forme éventuellement au-dessus du niveau de l'eau libre est envoyé sous contrôle de niveau vers le réseau de purge. Le gaz refroidi peut aussi être envoyé directement à la torche, sous contrôle de pression.

La période de chauffage demande 11 heures, ensuite le cycle est arrêté par le programmateur et par TS-1 qui signale que le fond du lit a atteint sa température de régénération de 250°C.

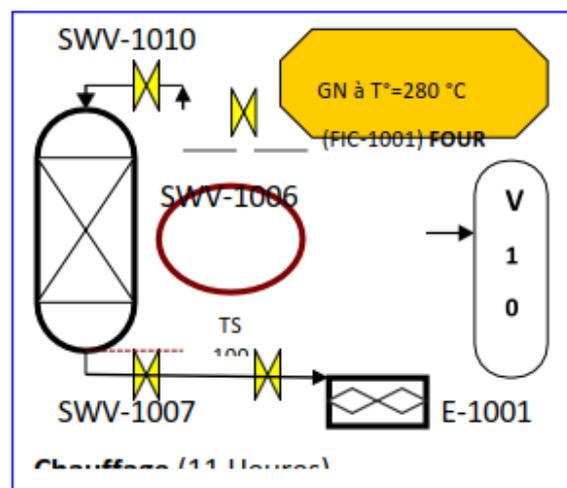


Figure 3-7 : Séquence de chauffage

## Chapitre 3 Présentation du complexe et section déshydratation de charge

### 3.8.4.4 Refroidissement :

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 lancer le refroidissement, les vannes 5 et 9 s'ouvrent et TS-2 est mis en service. Les vannes 7A et 10A restent ouvertes après la séquence de chauffage et E-1001 reste en service.

Le flux du gaz froid entrant dans le lit est maintenu par un contrôleur de débit. Le refroidissement demande 5 heures et sa fin est signalée par TS-2 qui indique que le dessus du lit s'est suffisamment refroidi (45 °C).

Le gaz utilisé pendant la séquence de refroidissement continue à s'écouler vers le réseau de fuel gaz. Après le refroidissement, les vannes du lit 9, 7A et 5 se ferment et TS2 est mis hors service.

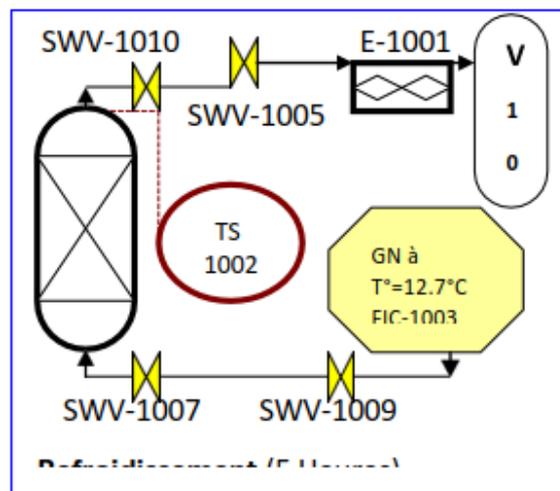


Figure 3-8 : séquence de refroidissement

### 3.8.4.5 Remise sous pression :

Avant de pouvoir réintroduire du GPL liquide dans la colonne, V- 1001A doit être remis sous pression par du gaz naturel (20 kg/cm<sup>2</sup> eff.) pour éviter une détente du GPL brut et ainsi une perte du produit.

Pour la remise sous pression, un faible débit de gaz naturel sous haute pression est introduit dans la colonne. Les vannes 13 et 4A s'ouvrent automatiquement et PDS-3 est mis en service.

La pression augmente dans la colonne jusqu'au point de tarage de PDS-3. La vanne 4A se ferme alors et PDS-3 est mis hors service. La pression dans V-1001A atteint alors 20 kg/cm<sup>2</sup> eff. L'opération de remise sous pression dure environ une demi-heure.

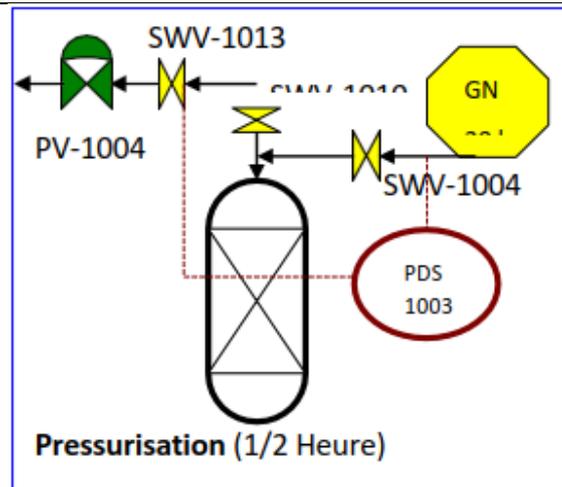


Figure 3-9 : Séquence de pressurisation

### 3.8.4.6 Remplissage en liquide :

Après la remise sous pression, le GPL liquide peut être réintroduit dans la colonne, sans risque de détente.

Au fur et à mesure que le GPL liquide remonte dans la colonne, le gaz est refoulé sous contrôle de pression en tête. Lorsque le niveau du liquide atteint LS-2, la vanne 12A se ferme. Cette opération demande environ une heure.

V-1001Aa alors achevé le cycle de régénération et se trouve en réserve. La durée de disponibilité en réserve est normalement de 53 heures. La durée totale de la régénération est de 19 heures. 17 heures plus tard, le cycle d'adsorption de V-1001B est achevé, et son cycle de régénération commence. V-1001C est mis en ligne et commence son cycle d'adsorption tandis que V-1001A reste en réserve.

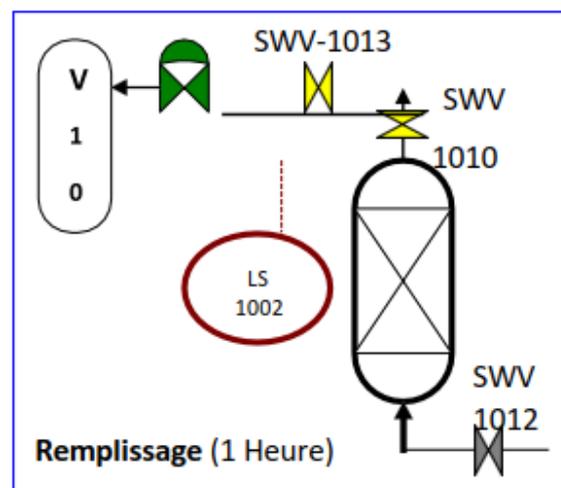


Figure 3-10 : Séquence de remplissage

# Chapitre 3 Présentation du complexe et section déshydratation de charge

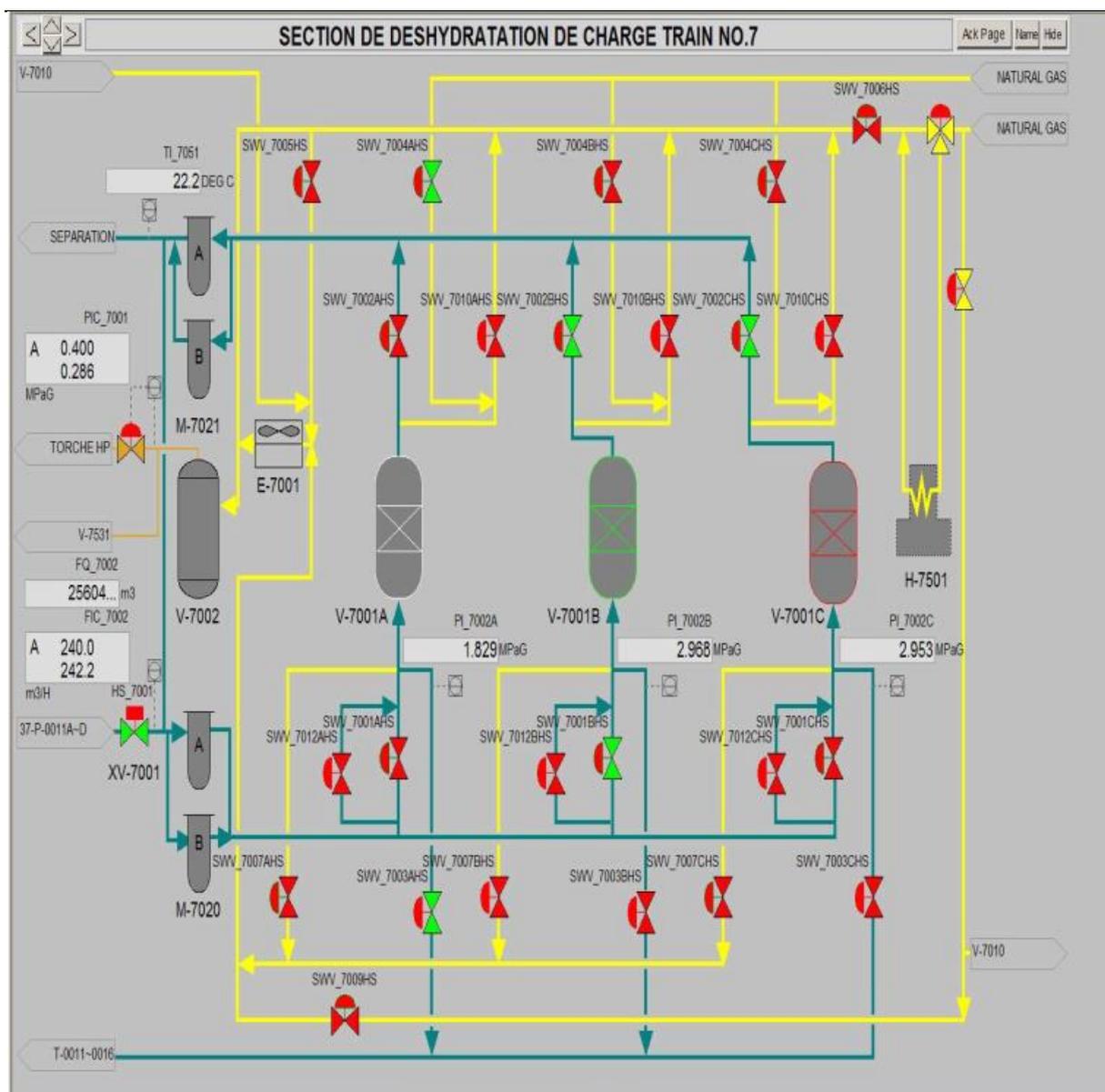


Figure 3-11 : schéma de la section déshydratation

# **Chapitre 4 :Présentation du problème et la méthode de calcul**

### 4.1 Présentation de problème :

Le problème que j'été posé c'est l'étude de l'impact de la diminution de la teneur en eau du GPL sur les paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge.

Le design de la déshydratation de charge du complexe GP1/Z a été conçu pour une teneur en eau dissoute dans la charge GPL égale à 100 ppm, mais actuellement on a remarqué que cette teneur n'est pas atteinte ; ceci est dû au prétraitement de la charge provenant du sud.

En effet pour une concentration en eau égale à 100 ppm le temps d'adsorption a été fixé à 36 heures et celui de la régénération à 19 heures. Mais les concentrations actuelles d'eau dans les charges GPL sont réduites à des valeurs qui peuvent même chuter jusqu'au moins de 25 ppm.

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 représentés sur le graphe ci-dessous **figure 1-1**

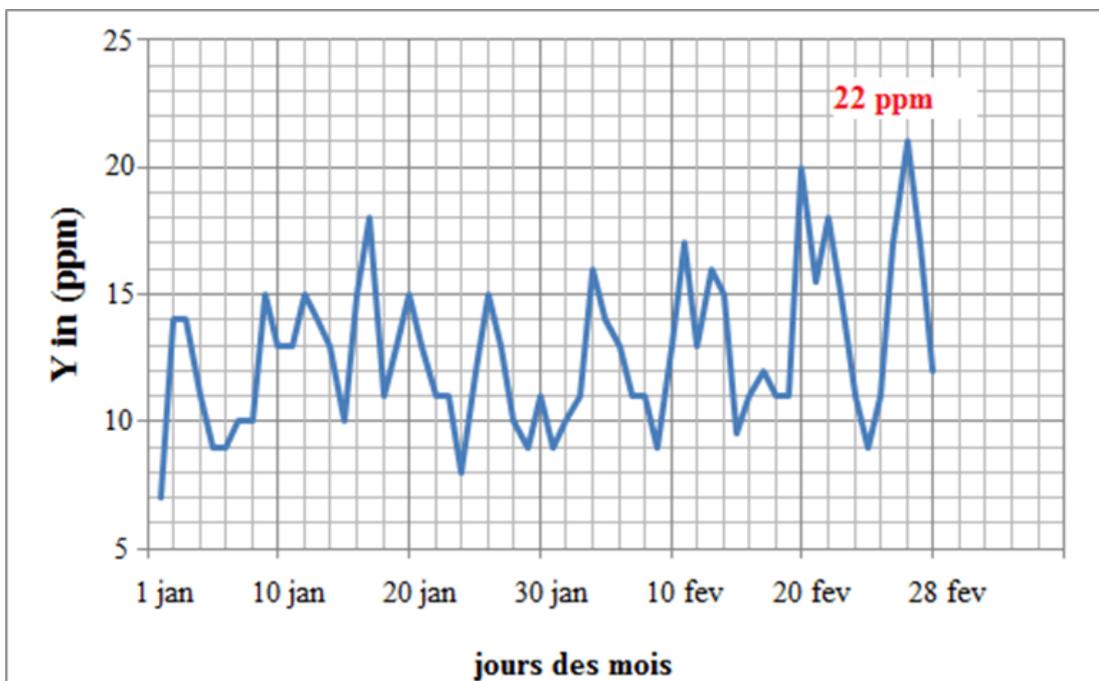


Figure 4-1 : La variation de la teneur en eau durant les mois (janvier et février)

### 4.1.1 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 une 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 ce travail consiste à effectuer une étude en prenant en considération les différentes concentrations en eau.

C'est pourquoi on a commencé par étudier si la prolongation du temps d'adsorption peut être une solution énergétiquement et économiquement valable pour ce problème.

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

On détermine si cette solution me permet le plus d'économiser de l'énergie et de préserver la durée de vie du desséchant sans perturber la capacité de production et la qualité du produit final.

## 4.2 Méthode de calcul :[12]

### Introduction

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 ce travail, où on va évaluer la quantité de chaleur et le débit de GN nécessaires à la régénération du sécheur.

## Chapitre 4      Présentation du problème et la méthode de calcul

---

Avant toute application, je m'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.

### 4.2.1 Constitution d'un déshydrateur de charge : [3], [7]

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 4-1** : [3]

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

*Tableau 4-1: La fiche technique du tamis moléculaire*

### Les conditions opératoires d'adsorption / désorption (cas réel) : [3]

- Durée d'adsorption : 36 heures.
- Durée de régénération : 19 heures.
- Réchauffage = 11 heures.
- Refroidissement = 5 heures.

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

- Réchauffage T = 280°C.
- Refroidissement T= 12.7°C.

## Chapitre 4      Présentation du problème et la méthode de calcul

---

### 4.2.2 Bilan énergétique :

#### Calcul de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération :

La quantité de chaleur nécessaire à la régénération est :

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

**Q tamis** : La chaleur nécessaire au réchauffage du tamis de la température d'adsorption à La température de désorption (KJ).

**Q acier** : La chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier de la température d'adsorption à La température de désorption (KJ).

**Q des** : La chaleur nécessaire à la désorption de l'eau fixée sur le tamis (KJ).

**Q pertes** : Considérées comme étant égales à 10% de la somme (Q tamis + Q acier + Q des) (KJ).

#### Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption de l'eau Q des :

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

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

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

#### Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis $Q_{tamis}$ :

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

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

$C_{pt}$  : La capacité calorifique du tamis (KJ/ kg. °c).

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

$T_{ads}$  : La température d'adsorption (°c).

#### Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier $Q_{acier}$ :

$$Q_{acier} = m_c * c_{pt} * (T - T_{ads})$$

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

$C_{pc}$  : La capacité calorifique de l'acier (KJ / kg. °c).

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

$$Q_{pertes} = 0.1 * (Q_{tamis} + Q_{des} + Q_{acier})$$

## Chapitre 4      Présentation du problème et la méthode de calcul

---

Pour pouvoir calculer les besoins en chaleur ( $Q$  totale), j'ai besoin de la température du lit en fin de chauffage «  $T$  » :

### Calcul de la température du lit « $T$ » : [12]

On peut l'obtenir par la relation suivante :

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

$T_e$  : La température d'entrée du gaz de régénération ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_s$  : La température de sortie du gaz de régénération ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### Calcul de la chaleur $H_f$ fournie par le four : [5]

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

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

### Calcul du temps de réchauffage du tamis « $t_r$ » : [12]

$$t_r = \frac{H_f}{\Delta H_{(T_e/T_{ads})}}$$

$M_g$  : Le débit du gaz de chauffage ( $\text{Nm}^3 / \text{hr}$ ).

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

$t_r$  : Le temps de chauffage ( $\text{hr}$ ).

### Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle « $H_f / \text{cycle}$ »

$$H_f / \text{cycle} = \frac{3 * H_f * t_r}{C_{cycle}}$$

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

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

$H_f / \text{cycle}$  : la chaleur fournie par le four par cycle ( $\text{kJ} / \text{hr}$ ).

$t_{ads}$  : le temps d'adsorption ( $\text{hr}$ ).

## Chapitre 4      Présentation du problème et la méthode de calcul

---

**Calcul du temps de refroidissement du tamis « tref » :**

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

**Calcul de la chaleur soutirée au système Qref :**

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

### 4.2.3 Le bilan de matière de la régénération : [12]

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

Le débit du gaz de refroidissement est calculé comme suit :

$$M_{ref} = \frac{Q_{ref}}{\Delta H_{(Ts-Te)}}$$

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

M réf : Le débit du gaz de refroidissement (kg / hr).

Q<sub>réf</sub> : la chaleur soutirée au système. (kj / hr).

T<sub>e</sub> : la température d'entrée du gaz de refroidissement (°c).

Après les bilans thermiques et matières, il faudra s'assurer que le débit calculé n'engendrera pas une perte de charge trop importante et que l'écoulement est bien turbulent.

**Calcul de la chute de pression : [12]**

La perte de charge par unité de longueur est donnée par l'équation modifiée :

$$\Delta P/L = (A * \mu * U) + (B * \rho_{GPL} * U^2)$$

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

$\mu$  : la viscosité du GN (Cp).

U : la vitesse superficielle (m/min).

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

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

A = 0.0561, B = 0.0000889

**Calcul du nombre de Reynolds :**

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

# **Chapitre 5 : Validation de méthode**

## Introduction

Avant d'entamer nos calculs, je m'assurons de la validité de la méthode adoptée.

Pour cela, je reprendrai le calcul d'un sécheur de la section déshydratation de la charge pour un taux de traitement égal à 100 %.

Je reprendrai essentiellement le calcul de la quantité de chaleur nécessaire à la régénération ainsi que le débit approprié.

Débit de traitement à 100% :  $Q = 240\text{m}^3/\text{hr} = 8675,09\text{ ft}^3/\text{hr}$

$P = 30.7\text{ Kg} / \text{cm}^2$

$T = 25\text{ °C} = 298,15\text{ k}$

La composition de la charge du GPL est représentée sur le tableau X :

| 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>i-C5</b> | 72,150    | 0, 20          | 0,14    |
| <b>n-C5</b> | 72,150    | 0, 05          | 0,04    |

*Tableau 5-1 : La composition de la charge du GPL*

Poids moléculaire du GPL :  $MGPL = \sum Y_i * M_i$   $MGPL = 49.19\text{ Kg} / \text{K mole}$ .

Solubilité de l'eau dans le GPL à  $T = 25\text{ °C}$  :  $SOL = 380\text{ ppm mole}$  (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 :  $\rho_{GPL} = 530\text{ Kg} / \text{m}^3 = 33.09\text{ Lb} / \text{ft}^3$ .

## 5.1 Dimensionnement d'un déshydrateur : [12]

### 5.1.1 Calcul de la quantité d'eau adsorbée :

#### Diamètre minimum du lit :

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

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

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

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

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

G : Vitesse massique de l'écoulement de fluide (kg /m<sup>2</sup> .hr).

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

$$G = 3600 * \sqrt{C * \rho_{tamis} * \rho_{GPL} * D_p}$$

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

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

C : Constante relative aux tamis moléculaire ( $C = g * 0,03291925 = 0.32 \text{ m} / \text{sec}^2$ )

#### Application Numérique :

$$G = 3600 * \sqrt{0.32 * 640 * 530 * 3.048 \times 10^{-3}}$$

A N :  $D_p = 3.048 \times 10^{-3} \text{ m}$

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

$\rho_{GPL} = 530 \text{ kg} / \text{m}^3 = 33.09 \text{ Lb} / \text{ft}^3$ .

$g = 10 \text{ m} / \text{sec}^2$ .  $C = 0.32$ .

$$G = 65693,56 \text{ kg/m}^2.\text{hr}$$

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

$$D_{min} = \sqrt{\frac{4 * 530 * 240}{3.14 * 66395.07}}$$

$$D_{min} = 1,58 \text{ m}$$

### La hauteur totale du lit : [12]

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

$$H_t = H_s + H_z$$

H<sub>s</sub> : la hauteur de la zone d'équilibre (m).

H<sub>z</sub> : la longueur de la zone de transfert de masse (m).

### 5.1.2 Calcul de la vitesse actuelle d'écoulement de fluide (U<sub>act</sub>) : [12]

$$U_{act} = \frac{Q}{S}$$

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

A.N

$$S = \frac{3.14 * 1.56^2}{4}$$

$$S = 1,96 \text{ m}^2$$

$$U_{act} = \frac{240}{1.91}$$

$$U_{act} = 122,37 \text{ m/hr} = 2,04 \text{ m/min}$$

### 5.1.3 Calcul le débit d'eau :

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

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

$$q_w = 3,75 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$$

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

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

$$H_z = 18,99 \text{ inch} = 0.48 \text{ m}$$

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

qw : quantité d'eau dans le gaz par unité de surface du déshydrateur [kg/hr.m<sup>2</sup>]

Rs : Saturation relative du gaz d'entrée en % [100% pour notre cas].

Uact : vitesse superficielle du gaz [m/mn].

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

$$H_s = H_t - H_z$$

$$H_s = 1,31 \text{ (m)}$$

Ht : la hauteur totale du lit (H t = 1.8 m).

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

**5.1.6 Estimation de la capacité d'adsorption à l'équilibre : [12]**

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:

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

$$X_s = 14,35 \text{ kg d'eau / 100 kg adsorbant}$$

**5.1.7 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 kg de dessicant (X):**

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

$$\mathbf{X = 11,98 \text{ kg d'eau / 100 kg de dessicant}}$$

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

**5.1.8 Estimation de la quantité d'eau adsorbée M ads:**

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

$$\mathbf{M_{ads} = 497,87 \text{ kg}}$$

**5.1.9 Calcul du temps d'adsorption :**

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

$$\mathbf{t_{ads} = 36,69 \text{ hr}}$$

**5.1.10 Détermination de l'efficacité d'adsorption :**

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

$$\mathbf{EFF = 0,83 = 83,5\%}$$

## 5.2 Calcul du bilan thermique : [12]

### 5.2.1 Propriété du gaz de régénération : [11]

#### 5.2.1.1 La composition du gaz de régénération :

| Composant | Xi en mole | Tref (k) | Trec (k) | $\Delta H^\circ$ (KJ/Kg) | Mi (Kg/Kmole) | xi % en poids | $\Delta H^\circ * Xi$ |
|-----------|------------|----------|----------|--------------------------|---------------|---------------|-----------------------|
| 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                 |
| iC4       | 0,0026     | 285,85   | 553,15   | 591,34                   | 58            | 0,01          | 4,77                  |
| nC4       | 0,0008     | 285,85   | 553,15   | 592,58                   | 58            | 0,00          | 1,47                  |
| iC5       | 0,004      | 285,85   | 553,15   | 585,59                   | 72            | 0,02          | 9,01                  |
| nC5       | 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                |

Tableau 5-2 : La composition du gaz de régénération.

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

$$M_{GN} = 18,71(\text{Kg} / \text{Kmole})$$

**Le gaz naturel de Réchauffage:** T= 280 °C=253k ; P = 4.5 kg / cm<sup>2</sup>

**Le gaz naturel de Refroidissement:** T= 12.7 °C=285,85k ; P = 4.5 kg / cm<sup>2</sup>

5.2.1.2 Calcul de la masse volumique du GN dans les conditions normal  $\rho_{GN}$ :

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

$$Z = 1.$$

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

$$\rho_{GN} = 0,83 \text{ Kg / Nm}^3$$

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

$$P = 1.01351 \text{ kg / cm}^2 = 1 \text{ atm. } R = 0.0821 \text{ (l. atm / mole. }^\circ\text{K)}$$

## 5.2.1.3 Calcul de l'enthalpie de chauffage du gaz de 12.7°C à 280°C [5]

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

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

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

$\Delta H$ : 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).

$$\Delta H = 640,66 \text{ Kj / Kg}$$

## 5.2.2 Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q tamis

Calcul de la masse du tamis  $m_t$  :

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

$$m_t = 4652,75 \text{ Kg}$$

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

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

$$\rho_{tamis} = 640 \text{ kg/m}^3.$$

### 5.2.3 Calcul de la température moyenne du lit en fin de chauffage : [12]

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

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

D'après l'équation :

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

$$T = 253,5 \text{ °C} = 487,9 \text{ °F} = 526 \text{ °K}$$

$$C_{pt} = 0.921 \text{ Kj/Kg.°c}$$

$$m_t = 4652,75 \text{ Kg}$$

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

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

D'après l'équation :

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

$$Q_{tamis} = 8,3 \cdot 10^5 \text{ Kj}$$

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

#### 5.2.4.1 Calcul du volume de l'acier (Vc): [12]

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

Avec:

Vc : Le volume total de l'acier (m)

S<sub>ext</sub> : La surface externe de la paroi du sécheur (m<sup>2</sup>).

S<sub>int</sub> : La surface interne de la paroi du sécheur (m<sup>2</sup>).

L : La hauteur de la colonne (m).

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

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

E<sub>p</sub> : L'épaisseur de l'acier. E<sub>p</sub> = 36.8 mm = 0,12 ft

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

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

$$V_c = 1,14 \text{ m}^3$$

**5.2.4.2 Calcul de la masse de l'acier  $m_c$  :**

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

$$m_c = 9,1 \cdot 10^3 \text{ Kg}$$

$\rho_{acier}$  : La masse volumique de l'acier ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) = 8009  $\text{kg}/\text{m}^3$

$$V_c = 1,14 \text{ m}^3.$$

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

$$m_c = 1,23 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

$C_{pc}$  : La capacité calorifique de l'acier ( $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ) = 502  $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$  [3]

$$m_c = 1,23 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

D'après l'équation

$$Q_{acier} = m_c * C_{pc} * (T - T_{ads})$$

$$Q_{acier} = 1,42 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

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

La quantité d'eau adsorbée  $M_{ads} = 497,87 \text{ kg}$ .

La chaleur de désorption  $\Delta H = 4186,8 \text{ kJ}/\text{kg}$ .

D'après l'équation

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

$$Q_{des} = 2,08 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

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

$$Q_{tamis} = 8,3 \cdot 10^5 \text{ KJ}$$

$$Q_{acier} = 1,42 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{des} = 2,08 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

D'après l'équation

$$Q_{pertes} = 0.1 * (Q_{tamis} + Q_{des} + Q_{acier})$$

$$Q_{perte} = 4,33 \cdot 10^5 \text{ kJ}$$

**5.2.7 Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération  $Q_{total}$**

D'après l'équation

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

**Q totale = 4,77 10<sup>6</sup> kj**

**5.2.8 Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage  $H_f$ : [12]**

**Calcul de l'efficacité thermique du four  $1/\varepsilon$ : [5]**

Efficacité thermique du four pendant le réchauffage:

$$\varepsilon = 2.25 + (0.03113 * t)$$

t : Temps de chauffage (hr).

D'après l'équation : à partir le tableau 4-1

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

**$H_f = 1,25 \cdot 10^7$  kj**

$1/\varepsilon = 0,38$  ;

$Q_{totale} = 4,77 \cdot 10^6$  kj

**5.2.9 Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr » : [12]**

**Les données sont représentées dans le tableau 5-3**

|  |                      |
|--|----------------------|
| <b>Quantité de chaleur apportée par le GN: <math>H_f</math> (BTU)</b>                        | 1.08 10 <sup>7</sup> |
| <b>Déférence de L'enthalpie (<math>\Delta H</math> (280-12.7) °c : 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                |

*Tableau 5-3 : Représentation des données de réchauffage du tamis*

Pour  $\Delta H$  en KJ / Nm<sup>3</sup> :  $\Delta H = \Delta H \text{ (Kj/ Kg)} * \rho_{GN}$

$$\Delta H = 640,66 \text{ Kj / Kg.}$$

$$\rho_{GN} = 0,83 \text{ Kg/ Nm}^3$$

$$\Delta H = 531,74 \text{ KJ/ Nm}^3$$

D'après l'équation

$$t_r = \frac{H_f}{\Delta H_{(T_e/T_{ads})} * M_{GN}}$$

$$H_f = 1,25 \cdot 10^7 \text{ kj}$$

$$\Delta H = 531.74 \text{ kj/ Nm}^3.$$

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

$$t_r = 11.7 \text{ hr}$$

$H_f$  : La chaleur fournie par le four pour le GN exprimée en (kj / Nm<sup>3</sup>).

$M_{GN}$  : Le débit du GN sortant du four exprimé en (Nm<sup>3</sup>/hr).

$\Delta H(T_e/T_{ads})$  : La différence de l'enthalpie du gaz (kj / Nm<sup>3</sup>)

#### 5.2.10 Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle « $H_f/cycle$ » : [12]

$$t_r = 11,7 \text{ hr.}$$

$$H_f = 1,25 \cdot 10^7 \text{ BTU.}$$

$$t_{ads} = 36,6 \text{ hr.}$$

D'après l'équation

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

$$H_f/CYCLE = 4,03 \cdot 10^6 \text{ kj / hr}$$

#### 5.2.11 Calcul du temps de refroidissement du tamis « tref » :

D'après l'équation :

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

$$t_{ref} = 5,57 \text{ hr}$$

$$Q_{\text{totale}} = 4,77 \cdot 10^6 \text{ j}$$

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

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

### 5.2.12 Calcul de la chaleur soutirée au système Q ref:

D'après l'équation :

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

$$Q_{\text{ref}} = 4,04 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 8,3 \cdot 10^5 \text{ Kj}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1,42 \cdot 10^6 \text{ kj}$$

$$t_{\text{ref}} = 5,57 \text{ hr}$$

## 5.3 Calcul du bilan de matière de la régénération : [12]

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

D'après l'équation

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

$$Q_{\text{ref}} = 4,04 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr.}$$

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

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

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

$$M_{\text{ref}} = 7,6 \cdot 10^2 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

### 5.3.2 Calcul des pertes de charge: [12]

#### 5.3.2.1 Calcul de la perte de charge $\Delta P/L1$ pour le GN chaud:

**Le gaz naturel de Réchauffage:**

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

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

**Calcul de la masse volumique du GN**

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

**Calcul du coefficient de compressibilité (Z):**

Le facteur de compressibilité est calculé par la formule suivante:

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

$$Z = 1,03 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

Avec P est la pression du travail exprimé en Psia

$$\rho_{GN} = 1,77 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

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

$$T = 280 \text{ }^\circ\text{C} = 553 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$P = 4,5 \text{ kg} / \text{cm}^2 = 4,44 \text{ atm.}$$

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

**5.3.2.2 Calcul de la vitesse superficielle U1 à travers le lit: [12]**

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

$$S = 0,502 \text{ m}^2$$

$$\rho_{GN} = 1,77 \text{ Kg} / \text{Nm}^3$$

$$M_g = 1669,22 \text{ kg} / \text{hr.}$$

$$U_1 = \frac{M_g}{60 * S * \rho_{GN}}$$

$$U_1 = 31,31 \text{ m} / \text{min}$$

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

Connaissant la densité relative dr et la pression de régénération :

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

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

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

$$\mu_1 = 0,02 \text{ Cp} = 0,043 \text{ Lb} / \text{ft} \cdot \text{hr} \text{ (Voir annexe 8).}$$

D'après l'équation

$$\Delta P / L = (A * \mu * U) + (B * \rho_{GPL} * U^2)$$

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

$\mu$  : Viscosité du GN (Cp)

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

A = 0,0561 ; B = 0,0000889

$$\Delta P/L1 = 0,70 \text{ psi / m}$$

### 5.3.2.4 Calcul de Re1:

$D_p = 0,0038 \text{ m}$

$\mu l = 0,02 \text{ Cp} = 0,06 \text{ kg / m .hr}$

$G = Mg / S = 3321,85 \text{ kg/ m}^2 \text{ .hr}$

D'après l'équation

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

$$Re 1 = 170,5$$

### 5.3.2.5 Calcul de la perte de charge $\Delta P/L2$ pour le GN froid: [12]

Calcul du coefficient de compressibilité (Z) : [5],[11]

$Z = f (Tr, Pr)$

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

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

$T_c, P_c$  : paramètres pseudo critiques.

$T_r, P_r$  : température et pression réduites.

$T_c = \sum Y_i * T_{ci}$  ;  $T_c = 194,3^\circ K$ .

$P_c = \sum y_i * P_{ci}$  ;  $P_c = 45,12 \text{ atm}$

$Z = f (Tr = 1,47 ; Pr = 0,1)$ .

Et selon l'annexe (D et E) : **Z = 0,91 Kgm3.**

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

$$\rho_{GN} = 3.88 \text{ Kg / m}^3 .$$

$$Z = 0,91$$

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

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

$$P = 4,5 \text{ kg / cm}^2 = 4,44 \text{ atm.}$$

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

### 5.3.2.6 Calcul de la vitesse superficielle $U_2$ à travers le lit: [12]

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

$$S = 0,502 \text{ m}^2$$

$$\rho_{GN} = 3,88 \text{ Kg / m}^3$$

$$M_g = M \text{ ref} = 760 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 635,02 \text{ kg / hr}$$

$$U_2 = \frac{M_g}{60 * S * \rho_{GN}}$$

$$U_2 = 5,43 \text{ m / min.}$$

### 5.3.2.7 Calcul de la viscosité du GN froid $\mu_2$ : [12]

Calcul de la densité relative  $dr$ :

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

$$dr = 0,64$$

$$T = 12,7 \text{ °C}$$

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

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

D'après l'équation

$$\Delta P/L = (A * \mu * U) + (B * \rho_{GPL} * U^2)$$

$$\Delta P/L = 5,43 \cdot 10^{-2} \text{ psi / m}$$

### Calcul de $Re_2$ : [10]

D'après l'équation :

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

$$Re_2 = 86,24$$

$$D_p = 0,003 \text{ m. (Voir annexe X).}$$

$$\mu_2 = 0,44 \text{ kg/m.hr.}$$

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

#### 5.4 Récapitulation des résultats :

Les résultats sont représentés sur le tableau 5-4

| Les valeurs calculées   | Les valeurs de design                               |
|---|---|
| $m_t = 3945,771125 \text{ kg}$  | $m_t = 4653 \text{ kg}$                             |
| $H_t = 2,1 \text{ m}$   | $H_t = 2,1 \text{ m}$                               |
| $H_f = 2.72 * 10^6 \text{ Kcal /hr}$  | $0,15 * 10^6 < H_f < 3,3 * 10^6 \text{ Kcal /hr}$   |
| $t_r = 11,7 \text{ hr}$   | $t_r = 11 \text{ hr}$                               |
| $t_{ref} = 5,5 \text{ hr}$  | $t_{ref} = 5 \text{ hr}$                            |
| $M_g = 2000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$<br>$M_{ref} = 760 \text{ Nm}^3/\text{hr}$       | $1000 < \text{Débit} < 2500 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ |
| $\Delta P_1 / L = 0,22 \text{ psi /ft}$<br>$\Delta P_2 / L = 0,017 \text{ psi /ft}$ | $0,01 < \Delta P / L < 0,25 \text{ psi /ft}$        |
| $Re_1 = 170,09$   | $Re > 100$  |
| $t_{ads} = 36,69 \text{ hr}$  | $t_{ads} = 36 \text{ hr}$                           |

*Tableau 5-4 : Représentation des valeurs de design et des valeurs calculées*

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 je puis désormais passer à l'application de ma méthode de calcul dans le cas où la teneur en eau dans la charge est de l'ordre de 25 ppm qui est la solution à étudier.

# **Chapitre 6 : Etude de la solution optimale**

## Introduction

En vue d'optimiser le temps d'adsorption, on procède au calcul du temps pour 25 ppm, utilisent la méthode de calcul pour déterminer si cette solution est optimale.

### 6.1.1 Calcul le temps d'adsorption :

### 6.1.2 Calcul le débit d'eau :

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

DL : le diamètre du lit. (DL=2.1 m =6.89 ft) (voir l'annexe B).

Y<sub>in</sub> : La teneur en eau dans la charge du déshydrateur exprimée en ppm massique

ρ<sub>GPL</sub> : Masse volumique de la charge (Kg/ m<sup>3</sup>)

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

Y<sub>in</sub> = 25 ppm

$$q_w = 0,94 \text{ kg/m}^2\text{hr}$$

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.

### 6.1.3 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse : [12]

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

q<sub>w</sub>: le débit d'eau en kg/m<sup>2</sup>.hr

U<sub>act</sub>: la vitesse actuelle d'écoulement de fluide.

R<sub>s</sub> : la teneur en eau dans la charge de GPL, R<sub>s</sub> = 25 %

$$H_z = 0,16 \text{ m}$$

Une zone de transfert inferieur a celle calculé précédemment à cause de la chute de la teneur d'eau dans la charge.

### 6.1.4 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre :

$$H_s = H_t - H_z$$

H<sub>s</sub> : la hauteur de la zone d'équilibre (ft).

H<sub>z</sub> : la longueur de la zone de transfert de masse (ft).

H<sub>t</sub> : la hauteur totale du lit (H<sub>t</sub> =1,8m = 5,9ft) (voir l'annexe X)

$$H_s = 1,63 \text{ m}$$

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

**6.1.5 Estimation de la quantité d'eau adsorbée  $M_{ads}$  : [12]**

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

**$M_{ads} = 543,36 \text{ kg}$**

$X_S$  : la capacité d'adsorption à 25°C,  $X_S = 22\%$  en poids (voir l'annexe X).

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

$C$  : Constante relative aux tamis moléculaire.

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

**6.1.6 Calcul du temps d'adsorption :**

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

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

$\rho_{GPL}$  : Masse volumique de la charge ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

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

**$t_{ads} = 168 \text{ hr}$**

**6.1.7 Détermination de l'efficacité d'adsorption :**

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

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

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

**$X = 13,71 \text{ kg d'eau} / 100 \text{ kg de dessicant}$**

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

**$EFF = 96$**

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

## 6.2 Calcul du bilan thermique : [12]

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

D'après l'équation

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

La quantité d'eau adsorbée  $M_{ads} = 497,87$  kg.

La chaleur de désorption  $\Delta H = 4186,8$  kJ/kg.

$$Q_{des} = 2,27 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

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

D'après l'équation

$$Q_{pertes} = 0.1 * (Q_{tamis} + Q_{des} + Q_{acier})$$

$$Q_{tamis} = 8,3 \cdot 10^5 \text{ KJ}$$

$$Q_{acier} = 1,42 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{des} = 2,08 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{perte} = 4,52 \cdot 10^5 \text{ kJ}$$

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

D'après l'équation

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

$$Q_{totale} = 4,98 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

### 6.2.4 Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage $H_f$ : [12]

#### Calcul de l'efficacité thermique du four $1/\varepsilon$ : [5]

Efficacité thermique du four pendant le réchauffage:

$$\varepsilon = 2.25 + (0.03113 * t)$$

t : Temps de chauffage (hr).

D'après l'équation : à partir le tableau ()

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

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

$$Q_{totale} = 4,77 \cdot 10^6 \text{ kJ.}$$

$$H_f = 1,31 \cdot 10^7 \text{ kJ}$$

**6.2.5 Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr » : [12]**

D'après l'équation

$$t_r = \frac{H_f}{\Delta H_{(T_e/T_{ads})} * M_{GN}}$$

$$H_f = 1,25 \cdot 10^7 \text{ kj}$$

$$\Delta H = 531.74 \text{ kj / Nm}^3.$$

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

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

$H_f$  : La chaleur fournie ant du four exprimé en (Nm<sup>3</sup>/hr).

$\Delta H(T_e/T_{ads})$  : La déférence de l'enthalpie du gaz (kj / Nm<sup>3</sup>)

**6.2.6 Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle «H<sub>f/cycle</sub>»: [12]**

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

$$H_f = 1,25 \cdot 10^7 \text{ BTU}.$$

$$t_{ads} = 168 \text{ hr}.$$

D'après l'équation

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

$$\mathbf{H_f/CYCLE = 9,6 \cdot 10^5 \text{ kj / hr}}$$

**6.2.7 Calcul du temps de refroidissement du tamis « tref »:**

D'après l'équation :

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

$$\mathbf{tref = 5,57 \text{ hr}}$$

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

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

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

**6.2.8 Calcul de la chaleur soutirée au système Q ref:**

D'après l'équation :

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

$$Q_{tamis} = 8,3 \cdot 10^5 \text{ Kj}$$

$$Q_{acier} = 1,42 \cdot 10^6 \text{ kj}$$

$$t_{ref} = 5,57 \text{ hr}$$

$$Q_{ref} = 4,04 \cdot 10^5 \text{ BTU/ hr}$$

**6.3 Calcul du bilan de matière de la régénération : [12]****6.3.1 Calcul du débit du gaz de refroidissement :**

D'après l'équation

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

$$Q_{ref} = 4,04 \cdot 10^5 \text{ BTU/ hr.}$$

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

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

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

$$M_{ref} = 7,6 \cdot 10^2 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

**6.3.2 Calcul des pertes de charge: [12]****6.3.2.1 Calcul de la perte de charge  $\Delta P/L1$  pour le GN chaud:**

Calcul de la vitesse superficielle  $U_1$  à travers le lit: [12]

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

$$S = 0,502 \text{ m}^2$$

$$\rho_{GN} = 1,77 \text{ Kg / Nm}^3$$

$$M_g = 1669,22 \text{ kg / hr.}$$

$$U_1 = \frac{M_g}{60 * S * \rho_{GN}}$$

$$U_1 = 31,31 \text{ m / min}$$

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

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

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

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

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

$$\mu_l = 0.02 \text{ Cp} = 0.043 \text{ kg /ft .hr (Voir annexe F)}.$$

D'après l'équation

$$\Delta P/L = (A * \mu * U) + (B * \rho_{GPL} * U^2)$$

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

$\mu$  : Viscosité du GN (Cp)

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

$$A = 0,0561 ; B = 0,0000889$$

$$\Delta P/L1 = 0,70 \text{ psi / ft}$$

**6.3.2.3 Calcul de  $Re_1$ :**

$$D_p = 0,0038 \text{ m}$$

$$\mu_l = 0,02 \text{ Cp} = 0,06 \text{ kg /m .hr}$$

$$G = M_g / S = 3321,85 \text{ kg/ m}^2.\text{hr}$$

D'après l'équation

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

$$Re_1 = 170,5$$

**6.3.3 Calcul de la perte de charge  $\Delta P/L_2$  pour le GN froid : [12]****6.3.3.1 Calcul de la vitesse superficielle  $U_2$  à travers le lit :**

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

$$S = 0.502 \text{ m}^2$$

$$\rho_{GN} = 3.88 \text{ Kg / m}^3$$

$$M_g = M_{ref} = 760 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 635.02 \text{ kg / hr}$$

$$U_2 = \frac{M_g}{60 * S * \rho_{GN}}$$

$$U_2 = 5,43 \text{ m / min.}$$

**6.3.3.2 Calcul de la viscosité du GN froid  $\mu_2$  :**Calcul de la densité relative  $dr$  :

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

$$dr = 0.64$$

$$T = 12.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 4.5 \text{ kg/cm}^2 = 450 \text{ Kpas}$$

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

D'après l'équation

$$\Delta P/L = (A * \mu * U) + (B * \rho_{GPL} * U^2)$$

$$\Delta P/L = 5,43 \cdot 10^{-2} \text{ psi / m}$$

**6.3.3.3 Calcul de  $Re_2$  : [10]**

D'après l'équation :

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

$$Re_2 = 86,24$$

$$D_p = 0.003 \text{ m. (Voir annexe B).}$$

$$\mu_2 = 0,44 \text{ kg/m.hr.}$$

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

**6.3.4 Interprétation des résultats :**

D'après tous les résultats obtenus, on a réalisé le but de ce 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 168 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.

## 6.4 Etude économique des résultats de la solution :

Afin de mettre en valeur la solution optimale dans ce travail, je propose une estimation du gain en gaz naturel, en prolongeant la durée de la phase d'adsorption jusqu'à 164 heures tout en gardant les séquences de chauffage et de refroidissement identiques aux designs. En effet, cette solution me permet, aussi, de préserver les tamis moléculaires et d'augmenter leur durée de vie, ce qui engendre un gain supplémentaire dans l'acquisition des tamis neufs.

### 6.4.1 Gain en gaz naturel :

Pour un cycle d'adsorption de 168 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 168 hr) est détaillé ci-dessous

#### 6.4.1.1 Le nombre de cycle /an :

$$\text{Le nombre de cycle/an} = \frac{\text{nombre d'heures par an}}{\text{duree d'un cycle}}$$

- Durée d'un cycle = 168 hr

$$\text{Le nombre de cycle/an} = \frac{8760}{168}$$

**Le nombre de cycle /an = 52 cycles**

#### 6.4.1.2 Le nombre de cycle gagnés par an pour un train :

**Le nombre de cycle gagnés**

$$= \text{nombre de cycle actuel}_{100\text{ppm}} - \text{le nombre de cycle}_{25\text{ppm}}$$

- Nombre de cycle actuel :

$$\text{Le nombre de cycle/an (actuel)} = \frac{\text{nombre d'heures par an}}{\text{duree d'un cycle(actuel)}}$$

**Durée d'un cycle (actuel) = 36**

$$\text{Le nombre de cycle/an} = \frac{8760}{36}$$

**Nombre de cycles actuels = 243 cycles**

$$\text{Le nombre de cycles gagnés} = 243 - 52$$

**Le nombre des cycles gagnés = 191 cycles**

### 6.4.1.3 Le gain en GN chaud pour un train par an :

Le débit de GN durant le chauffage = **2000 Nm<sup>3</sup> / hr**

$$\text{le gain en GN} = \text{nombre de cycle gagnes} * \text{debit de GN} * t_r$$

$t_r$  : temps de chauffage = 12 hr

$$\text{le gain en GN} = 191 * 2000 * 12$$

**Le gain en GN chaud = 4,20 .10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup> par an**

- Pour les 9 train :

$$\text{le gain en GN chaud total} = \text{gain en GN chaud}_{1\text{train}} * 9$$

**Le gain en GN chaud pour 9 trains = 42,33 .10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup> par an**

### 6.4.1.4 Le gain en GN froid pour un train par an :

Le débit de GN durant le refroidissement = **760 Nm<sup>3</sup> / hr**

$$\text{le gain en GN} = \text{nombre de cycle gagnes} * \text{debit de GN} * t_r$$

$t_r$  : temps de refroidissement = 6 hr

$$\text{le gain en GN} = 113 * 760 * 6$$

**Le gain en GN froid = 4,29 .10<sup>5</sup> Nm<sup>3</sup> par an**

- Pour les 9 train :

$$\text{le gain en GN froid total} = \text{gain en GN froid}_{1\text{train}} * 9$$

**Le gain en GN froid pour 9 trains = 7,27 .10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup> par an**

### 6.4.1.5 Le gain économique :

Prix unitaire du GN : 10<sup>3</sup> Contra m<sup>3</sup> = 1341,39 DA => **1 Nm<sup>3</sup> = 1,255 DA**

- **Gain en GN chaud = 1,255 \* 42,33 .10<sup>6</sup> = 53,12 .10<sup>6</sup> DA**
- **Gain en GN froid = 1,225 \* 7.27 .10<sup>6</sup> = 9,23 .10<sup>6</sup> 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 :

$$\text{Le gain réel annuel pour 9 trains} = \frac{53,12 * 10^6 + 9,12 * 10^6}{2}$$

**Le gain annuel en GN = 31,13 .10<sup>6</sup> DA**

#### 6.4.2 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 :

##### 6.4.2.1 Le coût de l'opération de changement du tamis moléculaire d'un déshydrateur chaque année :

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

- **Un déshydrateur revient = ( 4653 \* 355,08 ) = 1 652 168 DA**
- 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 changement du tamis moléculaire chaque phase :**

$$\text{Pour la phase I} = \frac{1\ 652\ 168}{9} = 183\ 574,2\ \text{DA}$$

$$\text{Pour la phase II} = \frac{1\ 652\ 168}{6} = 275\ 361,3\ \text{DA}$$

$$\text{Pour la phase III} = \frac{1\ 652\ 168}{9} = 183\ 574,2\ \text{DA}$$

Cela correspond à un cycle de 55 heures (36 heures adsorption et 19 heures de régénération) pour un sécheur.

**6.4.2.2 la durée de vie du sécheur**

Avec un cycle d'adsorption de 183 heures (164heures adsorption et 19 heures de régénération) **La durée de vie du sécheur dans la phase I et la phase III devient :**

$$\frac{183 * 9}{55} = 29,9 \approx \mathbf{30 \text{ ans}}$$

**La durée de vie du sécheur dans la phase II devient :**

$$\frac{183 * 6}{55} = 19,9 \approx \mathbf{20 \text{ ans}}$$

**6.4.2.3 Le gain dans l'opération de changement du tamis moléculaire chaque année :**

- **Le tamis moléculaire de la phase I**

Le cout de changement avec le nouveau cycle reviendrait à

$$\frac{1652\ 168}{30} = \mathbf{55072,26 \text{ DA}}$$

$$\mathbf{\textit{le gain annuel}} = 183\ 574,2 - 55072,26$$

**Le gain annuel en tamis de la phase I = 128501,94 DA**

- **Le tamis moléculaire de la phase I**

Le cout de changement avec le nouveau cycle reviendrait à

$$\frac{1652\ 168}{20} = \mathbf{82608,4 \text{ DA}}$$

$$\mathbf{\textit{le gain annuel}} = 275361,3 - 82608,$$

**Le gain annuel en tamis de la phase II = 128501,94 DA**

- **Le tamis moléculaire de la phase III**

Le cout de changement avec le nouveau cycle reviendrait à

$$\frac{1652\ 168}{30} = \mathbf{55072,26 \text{ DA}}$$

$$\mathbf{\textit{le gain annuel}} = 183\ 574,2 - 55072,26$$

**Le gain annuel en tamis de la phase III = 128501,94 DA**

**6.4.2.4 le gain annuel total pour le complexe**

$$\text{le gain total} = [(128501,94 * 12) + (192752,9 * 4) + (128501,94 * 9)]$$

**Le gain annuel total = 3469552,34 DA**

**6.5 Interprétation et représentation graphique de l'étude :****6.5.1 Présentation des résultats d'étude**

Pour faciliter les calculs et pour clarifier les résultats, et afin de gagner le temps et avoir la précision dans ce travail, j'ai utilisé Microsoft Excel, outil puissant traitant je donne plus Rapids et plus précis en programmant les équations et les méthodes multicritères choisis.

Les résultats des calculs réalisés avec le programme Excel sont présentés dans le tableau 6-1 ci-dessous.

| teneur en eau (ppm) | T ads (hr) | Mads (kg) | EFF | t re (hr) | Hf/cycle(kj) | t ref (hr) | Nombre des cycles gagnées | Gain en GN chaud (Nm3) | Gain en GN froid (Nm3) | Gain annuel en GN (DA) |
|---------------------|------------|-----------|-----|-----------|--------------|------------|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 10                  | 430        | 555       | 98% | 12,44948  | 382917,7179  | 5,57       | 219                       | 49 075 830,48          | 8338066,92             | 36027221               |
| 15                  | 285        | 551       | 97% | 12,40173  | 574808,9515  | 5,57       | 208                       | 46 432 094,92          | 7919259,91             | 34105475               |
| 20                  | 212        | 547       | 96% | 12,3573   | 767187,331   | 5,57       | 198                       | 44 041 405,11          | 7538526,26             | 32366407               |
| 25                  | 168        | 543       | 96% | 12,31516  | 960188,2441  | 5,57       | 187                       | 41 452 837,99          | 7119719,24             | 30479280               |
| 30                  | 139        | 540       | 95% | 12,27478  | 1153945,413  | 5,57       | 176                       | 38 886 499,11          | 6700912,23             | 28606101               |
| 35                  | 118        | 536       | 94% | 12,23579  | 1348593,905  | 5,57       | 165                       | 36 340 308,31          | 6282105,21             | 26745564               |
| 40                  | 102        | 533       | 93% | 12,19797  | 1544272,107  | 5,57       | 154                       | 33 812 768,73          | 5863298,20             | 24896732               |
| 45                  | 90         | 530       | 92% | 12,16113  | 1741123,242  | 5,57       | 142                       | 31 083 843,43          | 5406417,82             | 22897639               |
| 50                  | 81         | 527       | 92% | 12,12514  | 1939296,655  | 5,57       | 131                       | 28 591 083,12          | 4987610,81             | 21070630               |
| 55                  | 73         | 524       | 91% | 12,08991  | 2138949,004  | 5,57       | 119                       | 25 896 577,41          | 4530730,43             | 19093136               |
| 60                  | 66         | 521       | 90% | 12,05534  | 2340245,426  | 5,57       | 107                       | 23 218 581,86          | 4073850,05             | 17126001               |
| 65                  | 60         | 518       | 89% | 12,02137  | 2543360,725  | 5,57       | 94                        | 20 340 163,66          | 3578896,30             | 15009210               |
| 70                  | 56         | 515       | 89% | 11,98795  | 2748480,609  | 5,57       | 82                        | 17 694 220,60          | 3122015,92             | 13062188               |
| 75                  | 51         | 512       | 88% | 11,95503  | 2955803,023  | 5,57       | 69                        | 14 848 152,88          | 2627062,18             | 10965697               |
| 80                  | 48         | 509       | 87% | 11,92257  | 3165539,587  | 5,57       | 56                        | 12 017 954,43          | 2132108,44             | 8879164                |
| 85                  | 45         | 506       | 86% | 11,89054  | 3377917,182  | 5,57       | 42                        | 8 989 246,52           | 1599081,33             | 6644176                |
| 90                  | 42         | 503       | 85% | 11,8589   | 3593179,692  | 5,57       | 29                        | 6 190 343,76           | 1104127,58             | 4577281                |
| 95                  | 39         | 501       | 84% | 11,82762  | 3811589,96   | 5,57       | 15                        | 3 193 458,09           | 571100,47              | 2362260                |
| 100                 | 37         | 498       | 83% | 11,79669  | 4033431,968  | 5,57       | -                         | -                      | 0,00                   | 0                      |

Tableau 6-1 : résumé de résultat des calculs

### 6.5.1.1 Commentaires et interprétations :

Ce tableau représente les résultats importants de nos calculs, non seulement pour une teneur en eau de 25 ppm mais pour la variante de 10 à 100 ppm en teneur en eau. Ce que m'aide à étudier et optimiser la section de déshydratation à chaque changement de teneur en eau

Le tableau nous permet aussi de dessiner des courbes représentant l'impact de changement en teneur en eau sur l'optimisation de la section de déshydratation.

### 6.5.2 Présentation graphique des avantages de solution :

#### 6.5.2.1 Prolongation du temps d'adsorption :

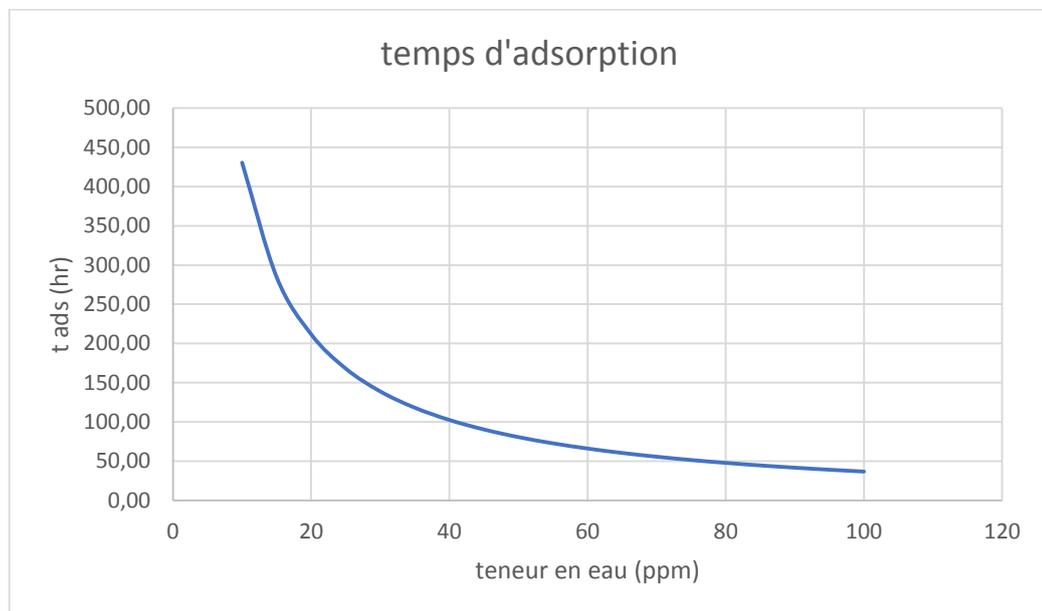


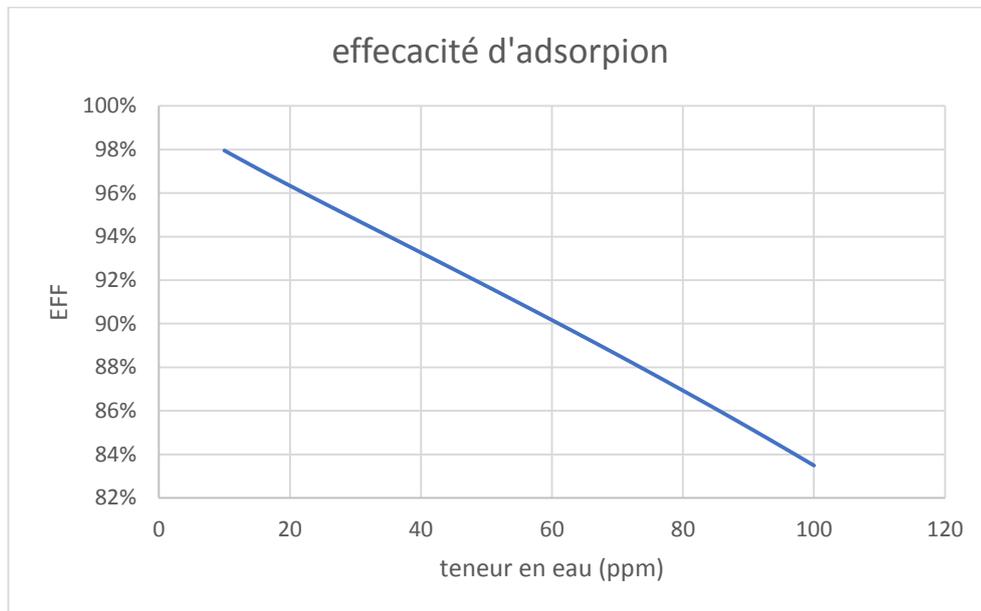
Figure 6-1 : le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau

Le graphe présenté dans la figure 5-1 représente le temps d'adsorption nécessaire pour saturation d'adsorbent pour un fonctionnement optimale de la section de déshydratation de la section de déshydratation de charge en fonction de la teneur en eau.

Le temps d'adsorption augmente avec la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL. Résultant en une diminution dans le nombre des cycles d'adsorption.

On remarque que le taux de chute de temps d'adsorption entre 20 ppm et 25 ppm est significativement grand. Ce qui nous oblige de modifier le temps de cycle de déshydratation plus si la teneur en eau dans la charge de GPL tombe en dessous de 20ppm.

### 6.5.2.2 L'efficacité d'adsorption



*Figure 6-2 : Efficacité d'adsorption en fonction de teneur en eau*

On remarque qu'il y a une légère augmentation d'efficacité avec la diminution de temps d'adsorption. Mais toujours dans l'intervalle des normes.

Cette augmentation est reliée à l'augmentation de masse d'eau adsorbée avec l'augmentation du temps d'adsorption.

### 6.5.2.3 La chaleur fournie par le four

L'augmentation de masse d'eau adsorbée influe également la chaleur fournie par le four. D'après les équations. Ou l'augmentation de la masse d'eau adsorbée diminue la chaleur fournie par le four.

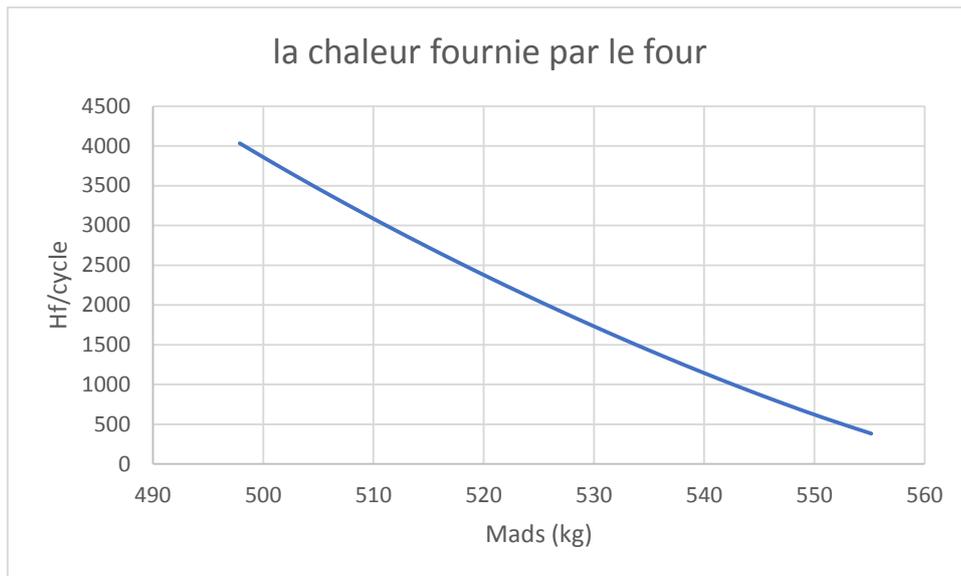


Figure 6-3 : la chaleur fournie par le four en fonction de la masse d'eau adsorber

6.5.2.4 La masse adsorber par le déshydrateur

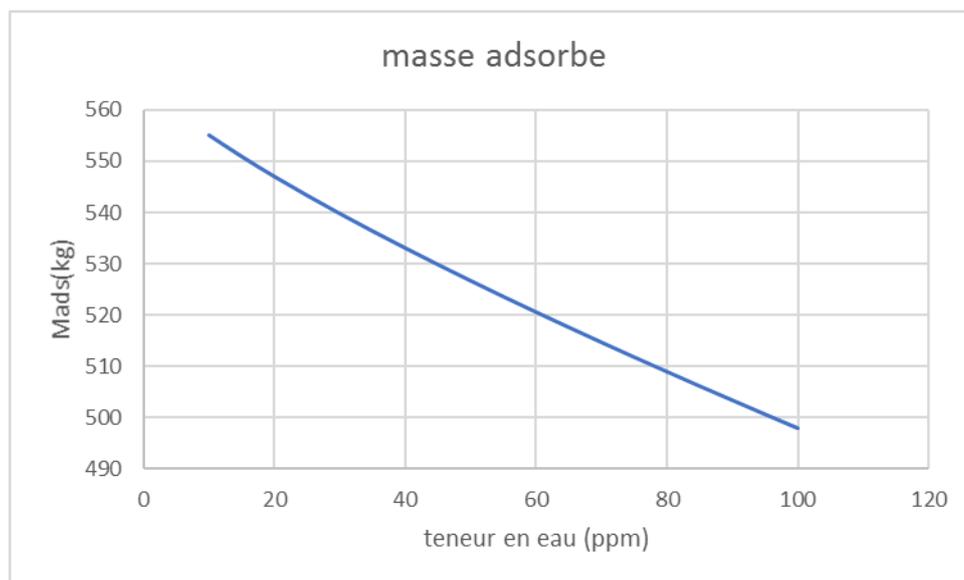
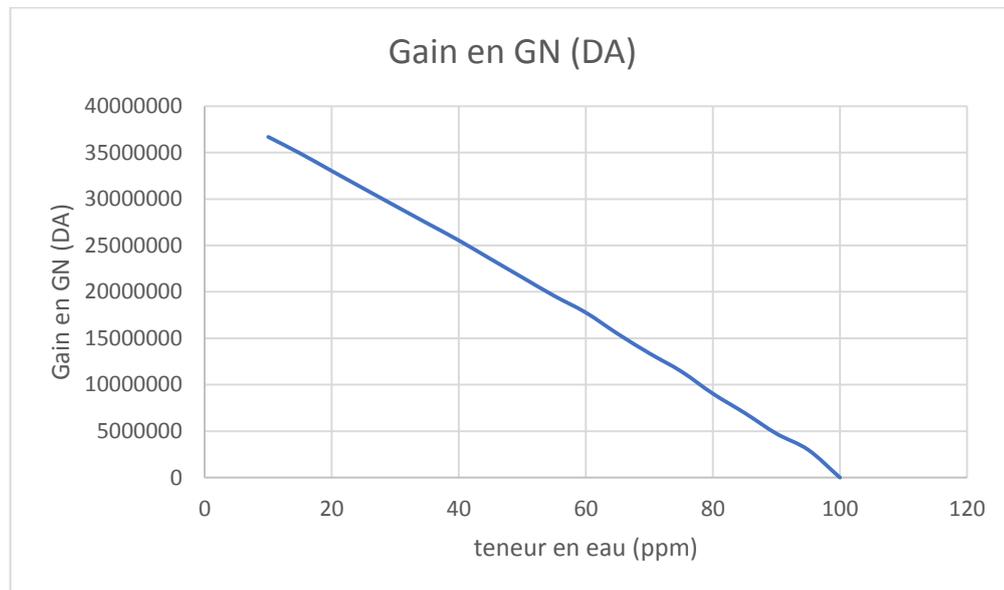


Figure 6-4 la masse d'eau adsorbée en fonction de teneur d'eau

La masse d'eau adsorbée par le déshydrateur à son tour est influé par la teneur en eau ou la masse d'eau adsorbée augment avec la diminution de la teneur en eau

Cela tient à l'élévation du temps d'adsorption

## 6.5.2.5 Gain économique



*Figure 6-5 Gain en GN annuel en fonction de teneur en eau*

La figure montre le gain économique annuel en gaz naturel si la prolongation de temps d'adsorption est mise en œuvre.

**Conclusion :**

D'après tous les Résultats obtenus, On ne peut optimiser le fonctionnement de la Section de déshydratation de la charge, que par la réalisation de la solution optimale du problème posé qui est : l'augmentation du temps d'adsorption du sécheur.

Cette augmentation présente plus d'avantage pour le système, car elle réduira le nombre de cycles par mois, avec une diminution de nombre de régénération entraînant :

- ❖ Une diminution de gaz naturel consommé lors de la régénération de la séquence de refroidissement.
- ❖ Une diminution de la Chaleur fournie par le four pour la séquence de chauffage, Calculée à la base d'une saturation totale du lit, parce que si l'on chauffe un lit qui n'est que partiellement rempli d'eau, l'énergie utilisée pour chauffer un tamis ne contenant pas d'eau est simplement perdue.
- ❖ Une augmentation de la durée de vie du tamis moléculaire.
- ❖ Une perte moins importante lors de la régénération du produit GPL piégé dans le tamis moléculaire.

# Conclusion générale

Les préoccupations au niveau du complexe GP1/Z étant de ramener la teneur en eau dans l'alimentation d'une valeur maximale de 100 ppm à 1 ppm dans la section de déshydratation.

Il nous a paru indispensable lors de mon formation d'étudier ce problème en vue d'optimiser les paramètres de fonctionnement de la section déshydratation de charge.

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 est réalisé dans :

- ❖ La durée de vie du tamis va être plus longue du fait que le vieillissement du tamis est dû surtout au dépôt de coke à haute température.

Avec l'augmentation du temps d'adsorption, le nombre de régénération est moindre donc le tamis est moins exposé à hautes températures lors de la séquence de chauffage.

- ❖ La durée de vie du matériel est plus longue du fait qu'avec un nombre de cycles moins important, le matériel est exposé à moins de contraintes de pression (moins de séquence de pressurisation et dépressurisation) et de contraintes de température (réchauffage et refroidissement).
- ❖ La durée de vie de la robinetterie comme les séquences sont gérées par les ouvertures et fermetures des vannes.

Cette optimisation nous permet d'économiser une quantité annuelle de GN de  $(49,5 \cdot 10^7 \text{ Nm}^3)$  qui se traduit par une valeur de  $(31,13 \cdot 10^6 \text{ DA})$ .

Et un gain annuel de valeur de  $3,47 \cdot 10^6 \text{ DA}$  pour les tamis moléculaires.

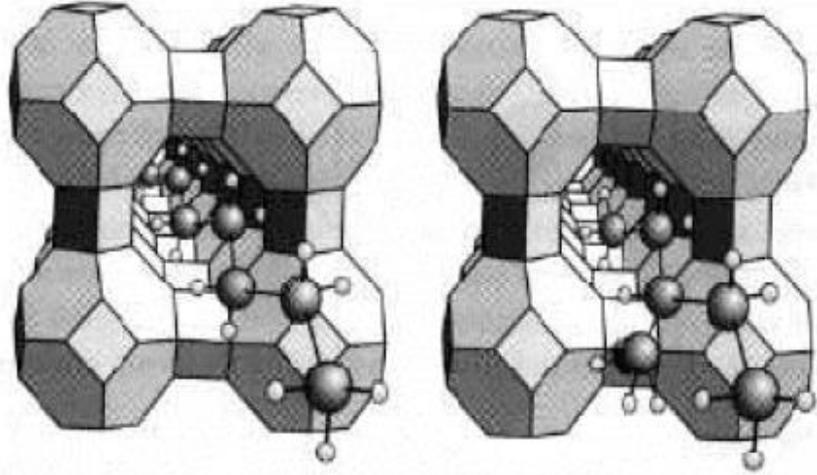
# Bibliographie

- [1]. Polycope I.A.P “ propane liquide déshydratation usine moléculaire Seive”
- [2]. Manuel operatoire ; process : volume 1 et 2.
- [3]. Catalogue mécanique ; manuel : volume.
- [4]. Manuel opératoire ; section déshydratation.
- [5]. Formation perfectionnement d'ingenieur. [6]. Déshydratation Bloc 11, module 3.
- [7]. Catalogue Mécanique ; process 3 : volume 1.
- [8]. DATA BOOK; Engineering.
- [9]. DATA BOOK Déshydratation and treating. Section 15,9<sup>ème</sup> edition , Rev ( 1974 - 1976).
- [10]. P.Wuithier Raffinage et génie Chimique, Edition tech.paris 1972 TOME 1.
- [11]. Sherwood; Proprieties of Gaz and Liquids.
- [12]. RUTHVEN D. M; Principles of Adsorption and Adsorption Process John Wiley et sons, New York.
- [13]. Grace ; les tamis moléculaire Caractéristiques et Applications Western Germany ; Juin 1980.
- [14]. Revue de I.F.P.
- Gras pretreatment: w.w Weterman Institut of gas technology Chicago
- [15]. Kohl & Richard - Gas Purification 5E [1]

# Annexes

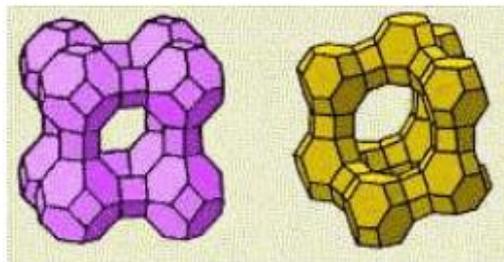
## Annexe A : Structure des tamis moléculaires

### Tamis moléculaires



Structure de zéolithe de type A

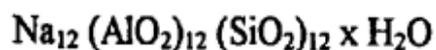
Structure de zéolithe de type X



## 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°

Tableau 2.1 - Coefficients des équations du pouvoir calorifique, de l'enthalpie et de l'entropie des mélanges de gaz parfaits.

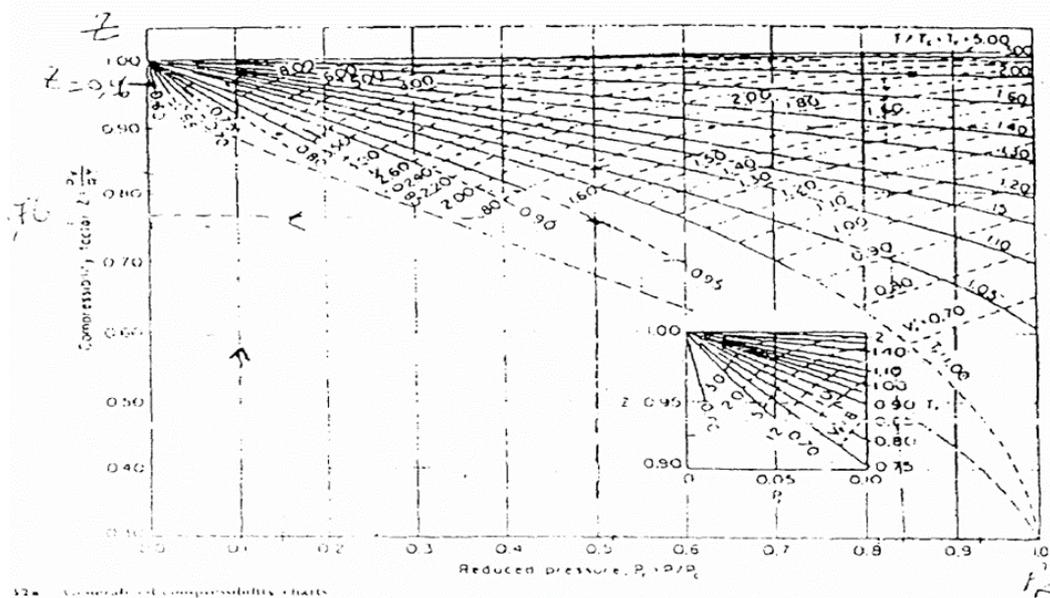
| No.<br>CPT               | Composant              | A          | B         | C x 10 <sup>3</sup> | D x 10 <sup>6</sup> | E x 10 <sup>6</sup> | F x 10 <sup>9</sup> | G          | Intervalle °C |
|--------------------------|------------------------|------------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|---------------|
| <i>Non-Hydrocarbones</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            | -1,332225           | 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 1200   |
| 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                       | n-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            | -1,365537           | 0,269340            | -0,149768           | 3,071276   | -20 to 1200   |
| 40                       | n-Octadécane           | 60,419501  | -0,098876 | 3,466295            | -1,367490           | 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



12\* General compressibility charts  
 $\frac{v}{v_c} = \frac{Z}{Z_c} \frac{T_r}{P_r}$

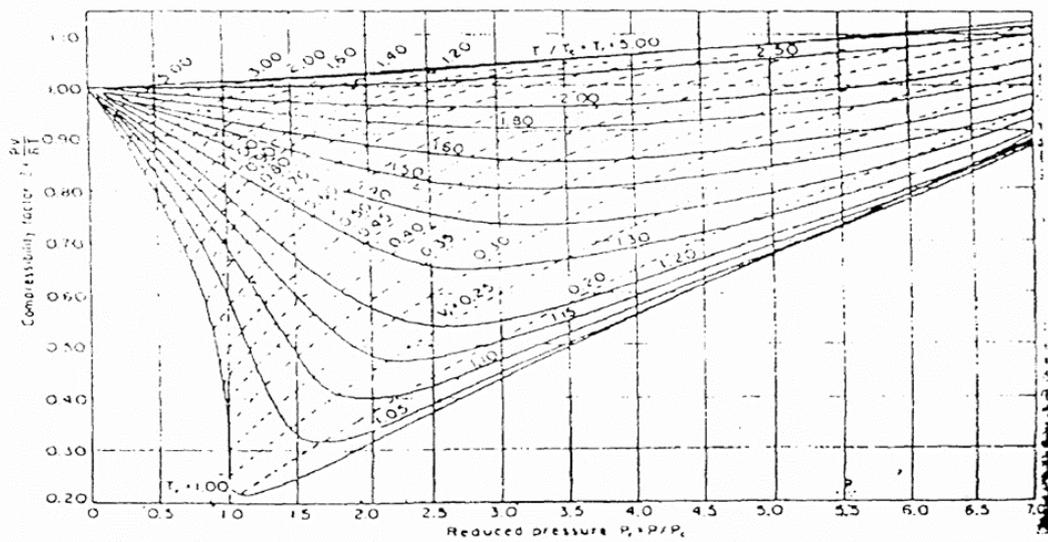


Figure VI- Détermination du coefficient de compressibilité  $Z$ .

**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. →<br><br>Compound | Formula                         | Critical constants                     |  |                                |   |   |                |                 | Number   |                             |
|--------|--------------------------------|---------------------------------|--|--|--------------------------------|---|---|----------------|-----------------|----------|-----------------------------|
|        |                                |                                 | A.<br>Molar mass<br>(molecular weight) | B.<br>Boiling point, °F<br>14,696 psia | Vapor pressure, psia<br>100 °F | C.<br>Freezing point, °F<br>14,696 psia | D.<br>Refractive index, n <sub>D</sub><br>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                                 | 188.68                         | -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          | 404.08          | 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          | 296.18          | 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*         | -400.3*         | 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                               | —                              | -345.995*                               | 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.**

