



Department of Process Engineering

Ref :...../U.M/F.S.T/2025

قسم هندسة الطرائق

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : GENIE DES PROCEDES

Option : GENIE CHIMIQUE

Thème

**Optimisation et validation des paramètres de fonctionnement de la section de
déshydratation au sein du complexe GP1/Z**

Présenté par :

1- BELARBI Farah

2- IZRI Saïd

Soutenu le, 29 /06 / 2025 devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------------|------------------------|-----|--------------------------|
| Président : | MEZOUAGH Amina | MCA | Université de Mostaganem |
| Examinatrice : | LARBI Nour El Houda | MCB | Université de Mostaganem |
| Rapporteur : | BELARBI Ilhem | MCB | Université de Mostaganem |

Année Universitaire 2024/2025

★ Remerciements ★

Tout d'abord, nous remercions Dieu, notre créateur de nos avoir donné les forces, la volonté et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.

Ce travail a été réalisé au niveau de l'unité de production du complexe

Gp1/Z, /SONATRACH

*Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre gratitude et nos vifs remerciements à notre encadrante Mme **I. BELARBI**, Maître de conférences à l'université de Mostaganem pour avoir assuré la direction de ce travail, pour nous avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement et sa grande disponibilité, ses conseils et son aide précieuse durant l'élaboration de ce travail.*

Il nous est agréable d'adresser nos remerciements à Mme A.

MEZOUAGH, Maître de conférences à l'université de Mostaganem de nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Nous remercions Mme N.H, Larbi Maître de conférences à l'université de Mostaganem, d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions très vivement le personnel du département de Production qui nous ont accueilli au sein du complexe Gp1/Z, pour leurs encouragements et leurs aides

Nous remercions l'ensemble des enseignants de la faculté des sciences et de la technologie.

Nos derniers remerciements et ne sont pas les moindres vont à tous ceux qui ont contribué de

Près ou de loin pour l'enrichissement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

**À ma chère mère, source inépuisable d'amour, de tendresse et de prières, pour ses
Sacrifices et son soutien moral inestimable.**

À mon père, pour sa confiance, ses encouragements constants et ses sages conseils.

**À ma sœur, pour son affection, son soutien moral et sa présence réconfortante tout au
Long de ce parcours.**

**À mes chers amis, pour leur soutien, leur motivation et leur précieuse amitié durant
toutes ces années universitaires.**

**À mon encadrante, pour ses orientations, ses remarques constructives, sa disponibilité et
son accompagnement tout au long de ce travail.**

**À l'ensemble du corps enseignant, pour les efforts consentis et les connaissances
transmises durant mon cursus universitaire.**

**À toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce
mémoire.**

**Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance et de ma sincère
gratitude.**

Avec mes sentiments les plus sincères et un énorme plaisir, que je dédie ce mémoire à mon très cher père et ma très chère mère, en témoignage de ma profonde gratitude, et de ma pleine reconnaissance, à la confiance et au soutien qu'ils m'accordent.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis pour mon éducation et mon bien être.

A mes très chers frères et sœurs

Je vous souhaite une vie pleine de succès, de joie et de bonheur. Que Dieu vous garde et illumine vos chemins.

A tous les membres de ma famille petits et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.

A mes chères amies

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous Avons passés ensemble, je vous dédie ce travail.

BELARBI Farah

Table des matières

| | |
|--|------|
| Dédicaces | I |
| Remerciements | II |
| Liste des figures | III |
| Liste des tableaux | IV |
| Liste des abréviations | V |
| Résumé | Vi |
| Bibliographie | |
| Introduction Générale | -1- |
| Chapitre I : PARTIE THEORIQUE | |
| I.1 Introduction | -3- |
| I.2 Caractéristiques générales des Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) | -3- |
| I.3 Utilisations des Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) | -5- |
| I.4 La consommation nationale en GPL | -7- |
| I.5 Les risques associés aux Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) | -8- |
| I.6 Les installations du complexe GP 1Z | -9- |
| I.6.1 Les Installations de Production | -10- |
| I.6.1.1 Section de Déshydratation | -10- |
| I.6.1.2 Section de Séparation du GPL | -10- |
| I.6.1.3 Section de Réfrigération | 11- |
| I.6.1.4 Section d’Huile Chaude | -12- |
| I.7 Section Déshydratation de Charge | -12- |
| I.7.1 Les modes de déshydratation | -13- |
| I.7.2 Déshydratation par Absorption dans un Liquide | -14- |
| I.7.3 Déshydratation par Adsorption sur un Solide | -14- |
| I.7.3.1 Généralités | -14- |
| I.7.3.2 Les Adsorbants | -14- |
| I.8 Les Hydrates | -16- |
| I.8.1 Définition | -16- |
| I.8.2 Les conditions de formation des hydrates | -16- |
| I.9 Les Tamis Moléculaires | -17- |
| I.9.1 Type et Dimension du Tamis Moléculaire | -20- |
| I.9.2 Régénération des Tamis Moléculaires | -20- |
| I.9.2.1 Régénération thermique | -20- |
| I.9.2.2 Régénération par dépressurisation | -21- |

| | |
|--|------|
| Chapitre II : partie pratique | |
| II.1 Introduction | -22- |
| II.2 Constitution d'un déshydrateur de charge | -23- |
| II.2.1 Les conditions opératoires d'adsorption / désorption (cas réel) | -23- |
| II.2.2 Température d'entrée du gaz de régénération | -24- |
| II.3. La théorie de calcul | -24- |
| II.3.1. Le bilan énergétique | -24- |
| | -26- |
| II.3.2. Le bilan de matière de la régénération | |
| II.3.3. Calcul de la chute de pression | -27- |
| II.3.4. Calcul du nombre de Reynolds | -27- |
| II.4. Validation de méthode | -27- |
| II.4.1. Composition de la charge du GPL | -28- |
| II.5. Dimensionnement d'un déshydrateur | -29- |
| II.5.1. Calcul de la quantité d'eau adsorbée | -29- |
| II.5.2. Estimation de la capacité d'adsorption à l'équilibre | -31- |
| II.6. Calcul du bilan thermique | -32- |
| II.6.1. Propriété du gaz de régénération | -32- |
| II.6.2. Calcul de la masse volumique du GN dans les conditions normal pGN | -33- |
| II.6.3. Calcul de l'enthalpie de chauffage du gaz de 12.7°C à 280° | -34- |
| II.6.4. Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q tamis | -34- |
| II.6.5. Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage de l'acier | -35- |
| II.7. Calcul du bilan de matière de la régénération | -39- |
| II.7.1. Calcul du débit du gaz de refroidissement | -39- |
| II.8. Calcul des pertes de charges | -39- |
| II.8.1. Calcul de la perte de charge $\Delta P/L1$ pour le GN chaud | -39- |
| II.8.2. Calcul de la perte de charge $\Delta P/L2$ pour le GN froid | -41- |
| II.9. Étude de la première solution | -44- |
| II.10. Calcul du bilan thermique | -46- |
| II.11. Calcul du bilan de matière de la régénération | -49- |
| II.12. Calcul des pertes de charges | -51- |
| II.13. Interprétation des résultats | -53- |
| II.14. Étude de la deuxième solution | -54- |
| II.15. Calcul du bilan thermique | -56- |
| II.16. Interprétation des résultats | -57- |

| | |
|--|------|
| II.17. Interprétation et Choix de la Solution Optimale | -57- |
| II.18. Comparaison entre les deux Solutions Optimales | -60- |
| II.19. Modification du temps de régénération | -61- |
| II.20. Calcul Économique | -62- |
| Conclusion générale | -67- |
| Annexe | |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : La demande nationale de GPL | 8 |
| Figure I.2 : Schéma de procédé de liquéfaction du GPL | 10 |
| Figure I.3: schéma de la section déshydratation | 13 |
| Figure I.4 : Tamis moléculaire sous ses différentes formes | 19 |
| Figure I.5 : Les tamis moléculaires 3A et 4A | 19 |
| Figure II.1: le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau. | 59 |
| Figure II.2 : Quantité de GN utilisée pendant une régénération en fonction de la Teneur en eau pour la première solution | 60 |
| Figure II.4: le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau | 60 |
| Figure II.5: Quantité de GN utilisée pendant une régénération en fonction de la Teneur en eau pour la deuxième solution. | 61 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I.1 : Caractéristiques physico-chimiques du butane et du propane | 6 |
| Tableau I.2 : diamètres critiques de certaines molécules | 18 |
| Tableau II.1: La fiche technique du tamis moléculaire. | 23 |
| Tableau II.2: composition de la charge du GPL | 28 |
| Tableau II.3: La composition du gaz de régénération | 33 |
| Tableau II-4 : les valeurs utilisées pour calculer le temps de réchauffage du tamis | 38 |
| Tableau II.5 : Récapitulations des résultats | 43 |
| Tableau II.6 : vérification d'adsorption par rapport du temps | 52 |
| Tableau II.7 : hauteurs du lit non utilisés | 57 |
| Tableau II.8 : temps de régénération fixé | 58 |
| Tableau II.9 : temps d'adsorption fixé | 59 |
| Tableau II.10 : le gain annuel en GN et en vie des tamis pour le cycle calculé. | 65 |

الملخص:

تم تطبيق منهجين مختلفين. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الكفاءة التشغيلية لقسم تجفيف الشحنة بهدف تحسين أدائه. ويسمح هذا العمل بتقديم ومقارنتهما لتحديد المنهج الذي يحقق أفضل النتائج، مع ضمان الالتزام بالمواصفات الفنية للنظام. توصيات عملية لتحسين كفاءة العملية بشكل عام.

الكلمات المفتاحية :

نزع الرطوبة، المجفف، المنخل الجزيئي، سرير، التجفيف

Abstract:

This study aims to assess the operational efficiency of the feed dehydration section with the objective of optimizing its performance. Two distinct approaches were implemented and compared in order to identify the one that delivers the most satisfactory results, while ensuring compliance with the system's technical specifications. This work thus provides concrete improvement recommendations to enhance the overall efficiency of the process.

Keywords:

Dehydration, Dreyer, molecular sieve, drying bed, drying

Résumé

Cette étude vise à évaluer l'efficacité opérationnelle de la section de déshydratation de charge dans le but d'optimiser ses performances. Deux approches distinctes ont été mises en œuvre et comparées afin d'identifier celle offrant les résultats les plus satisfaisants, tout en assurant le respect des spécifications techniques du système. Ce travail permet ainsi de proposer des recommandations d'amélioration concrètes pour une meilleure efficacité du procédé.

Mots clés :

Déshydratation, sécheur, tamis, lit, sécheur

Bibliographie

- [1]. Polycope I.A.P “ propane liquide déshydratation usine moléculaire Seive”
- [2]. Revue de I.F.P. Gras pretreatment: w.w Waterman Institut of gas technology Chicago
- [3]. Manuel opératoire ; process : volume 1 et 2. Document GP1-Z
- [4]. Déshydratation Bloc 11, module 3.
- [5]. DATA BOOK Déshydratation and treating. Section 15,9^{ème} édition , Rev (1974 - 1976).
- [6]. Kohl & Richard - Gas Purification.

- [7]. Catalogue mécanique ; manuel : volume 1. Document GP1-Z
- [8]. Formation perfectionnement d'ingénieur
- [9]. Catalogue Mécanique ; process 3 : volume 1. IHI GP-1Z.
- [10]. DATA BOOK; Engineering
- [11]. P. Wuithier Raffinage et génie Chimique, Edition tech. Paris 1972 TOME 1.
- [12]. Sherwood; propriétés des gaz and liquids.
- [13]. RUTHVEN D. M; principes of adsorption and adsorption process John Wiley et sons,
New York.
- [14]. Grace ; les tamis moléculaire Caractéristiques et Applications Western Germany ;
Juin1980.
- [15]. Manuel opératoire ; section déshydratation.

Document GP1-Z

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'histoire de la civilisation est largement marquée par la quête de l'énergie par l'homme. À travers des techniques toujours plus avancées, celui-ci a progressivement découvert et exploité les réserves naturelles d'énergie, telles que le charbon, le pétrole et le gaz.

Aujourd'hui, le pétrole et le gaz constituent incontestablement les ressources naturelles les plus stratégiques de notre pays. Parmi eux, le gaz de pétrole liquéfié (GPL) représente un enjeu majeur sur le marché mondial des combustibles, aux côtés du kérosène et du naphta.

Autrefois, l'énergie étant peu coûteuse, les industries ne lui accordaient qu'une attention limitée. Cependant, avec l'augmentation significative de son coût ces dernières années, les entreprises ont dû se concentrer sur cette dépense, désormais déterminante dans le prix de revient des produits finis.

Dès lors, une nouvelle priorité s'est imposée dans les unités industrielles, l'optimisation ne se limite plus seulement au profit immédiat ou à l'accroissement de la production, mais vise aussi à maximiser l'efficacité énergétique des équipements. Aujourd'hui, la maîtrise de la consommation d'énergie est aussi cruciale que la sécurité, la réduction de la pollution ou le contrôle qualité [1] .

C'est dans cette optique que s'inscrit notre projet de mise en situation professionnelle, axé sur l'optimisation de la section de déshydratation de la charge du complexe GP1/Z, où une surconsommation énergétique a été constatée. Notre mission consiste à identifier les origines du problème, en analysant les causes et proposant des solutions, sans perturber le fonctionnement normal du complexe ni engendrer de coûts supplémentaires.

Cette démarche s'aligne sur les préoccupations des exploitants, pour qui la performance énergétique est un enjeu clé.

INTRODUCTION GENERALE

Notre travail vise à identifier les causes de la surconsommation énergétique dans la section de déshydratation. Pour cela, nous menons une analyse thermique et massique approfondie, en nous appuyant sur des calculs précis des flux de chaleur et des bilans matière.

Afin de garantir la fiabilité de notre approche, nous appliquons initialement la méthode de calcul à un sécheur opérant dans ses conditions nominales de conception. (Design). Cette étape cruciale nous permet de valider nos modèles par confrontation systématique des résultats théoriques avec les données opérationnelles réelles.

En phase conclusive de notre étude, nous développons un outil de calcul performant destiné à déterminer les paramètres optimaux de fonctionnement du déshydrateur. Ce programme constitue une solution pragmatique pour améliorer l'efficacité énergétique tout en respectant les contraintes industrielles existantes.

INTRODUCTION GENERALE

Bibliographie

[1] : Gestion de l'énergie dans l'industrie : méthodes et outils" Auteur Jean-Pierre
Dumas

CHAPITRE I : PARTIE THEORIQUE**I.1. INTRODUCTION**

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) désigne un mélange d'hydrocarbures appartenant à la famille des paraffines, principalement constitué de propane (C_3H_8), et de butane (C_4H_{10}) et il y a aussi des traces de pentane (C_5H_{12}) et de méthane (CH_4), d'éthane (C_2H_6).

Ces composés se trouvent à l'état gazeux dans les conditions normales de température et de pression, mais présentent la particularité de pouvoir être facilement liquéfiés par simple augmentation de la pression, abaissement de la température ou par l'action combinée des deux.

Cette caractéristique permet ainsi de réduire considérablement leur volume de stockage, puisqu'un mètre cube de GPL sous forme liquide équivaut à environ 225 mètres cubes à l'état gazeux. Le GPL est essentiellement obtenu à partir de deux sources principales : d'une part, lors du processus de distillation du pétrole brut dans les raffineries, et d'autre part, lors des opérations de dégazolinage effectuées sur les champs de production de gaz naturel, permettant de récupérer les hydrocarbures condensables tels que le propane et le butane.

Autrefois perçu comme un simple sous-produit, souvent éliminé par torchage sur les sites pétroliers, le GPL est désormais reconnu comme une ressource énergétique précieuse. Il s'impose aujourd'hui comme une alternative intéressante, tant comme carburant que comme source d'énergie pour les usages domestiques et industriels, avec bonne performance énergétique et réduction de l'empreinte environnementale.

I.2. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES GAZ DE PÉTROLE LIQUÉFIÉ (GPL)

Les gaz de pétrole liquéfié (GPL) possèdent des propriétés physico-chimiques particulières qui conditionnent leurs conditions d'exploitation, de stockage et de transport. À l'état naturel, les GPL sont incolores et inodores, tant en phase liquide qu'en phase gazeuse. Cependant, pour des raisons de sécurité, un agent odorant à base de composés soufrés, comme

le di-éthylmercaptan ou le diméthylsulfure, est systématiquement ajouté afin de rendre perceptible toute fuite éventuelle [1].

Sous des conditions normales de température et de pression, ces gaz sont plus lourds que l'air : le butane présente une densité en phase gazeuse environ deux fois supérieure à celle de l'air, tandis que le propane affiche une densité équivalente à une fois et demie celle de l'air. Cette densité diminue progressivement avec l'augmentation de la température ambiante.

Par ailleurs, les GPL sont non corrosifs pour les aciers ainsi que pour la majorité des alliages de cuivre et d'aluminium. Ils sont faiblement toxiques, que ce soit sous forme gazeuse ou liquide, et n'offrent aucune propriété lubrifiante, ce qui nécessite de prendre certaines précautions lors de la conception et de l'exploitation des installations dédiées à leur utilisation. La tension de vapeur constitue également un paramètre essentiel dans la gestion du GPL : elle est de l'ordre de 8 bars pour le propane et de 2 bars pour le butane à une température de 20°C. À l'état liquide, ces gaz présentent un coefficient de dilatation important, obligeant à ne jamais remplir complètement les réservoirs de stockage afin d'éviter tout risque de surpression.

En ce qui concerne leurs caractéristiques thermiques, les GPL se distinguent par des températures d'ébullition basses, situées à -42°C pour le propane et -6°C pour le butane à pression atmosphérique. Leur pouvoir calorifique élevé constitue l'un de leurs atouts majeurs, particulièrement dans le cadre des applications domestiques et industrielles. Ainsi, le propane possède un pouvoir calorifique de 22 506 kcal/kg, contre 29 622 kcal/kg pour le butane.

Enfin, la qualité des GPL commercialisés est rigoureusement contrôlée, notamment en ce qui concerne la teneur en impuretés telles que le soufre, qui doit rester inférieure ou égale à 0,005 % en masse, et l'humidité, dont la présence excessive pourrait provoquer la corrosion des conduites et l'obstruction des équipements [2], le tableau I.1 regroupe les caractéristiques physico-chimiques du butane et du propane.

Tableau I.1 : 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/m³) | 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/m³) | 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 |

I.3. UTILISATIONS DES GAZ DE PÉTROLE LIQUÉFIÉ (GPL)

Les GPL sont utilisés dans plusieurs domaines grâce à leurs caractéristiques énergétiques et environnementales avantageuses. Leurs principales applications se répartissent comme suit :

I.3.1. Carburant automobile

Utilisés comme alternative aux carburants traditionnels, les GPL permettent de réduire les émissions polluantes et d'améliorer la qualité de l'air.

I.3.2. Climatisation

Deux principes d'utilisation sont possibles :

- ❖ Par vaporisation, le GPL absorbe la chaleur de l'environnement et produit du froid.

- ❖ Un moteur fonctionnant au GPL entraîne un compresseur qui comprime un gaz, et lors de la détente, celui-ci absorbe de la chaleur et génère du froid.

I.3.3. Source de chauffage

Malgré l'essor du gaz naturel, le GPL reste utilisé pour le chauffage domestique et industriel, grâce à des équipements spécialement conçus pour ce combustible.

I.3.4. Production d'énergie

Le GPL est utilisé dans les centrales électriques pour remplacer des combustibles plus polluants comme le charbon et les fuels. Ses avantages incluent :

- ❖ Une meilleure protection de l'environnement.
- ❖ Une diversification des sources d'énergie et une réduction de la dépendance énergétique.

I.3.5. Pétrochimie

Les GPL constituent une matière première essentielle dans plusieurs procédés industriels :

- ❖ Production d'oléfines via les vapocraqueurs.
- ❖ Fabrication de butadiène et de propylène pour les caoutchoucs synthétiques.
- ❖ Production de MTBE, utilisé comme additif pour augmenter l'indice d'octane des essences.
- ❖ Synthèse de produits chimiques tels que l'acétaldéhyde, le formaldéhyde, l'acide acétique et l'acétone.

I.3.6. Secteur agricole

Employé dans l'aviculture, les serres agricoles et l'élevage pour :

- ❖ Le chauffage.
- ❖ L'éclairage.
- ❖ La climatisation des installations.

La consommation actuelle reste modeste (environ 40 000 tonnes/an), mais des perspectives de croissance sont attendues à moyen et long terme.

I.4. LA CONSOMMATION NATIONALE EN GPL

Le niveau de la demande nationale de GPL est de l'ordre de 1,4 millions de t/an (sources NAFTAL Année 2007) dont 90% de butane, 5% de propane et 5% de GPL carburant (Figure I.1).

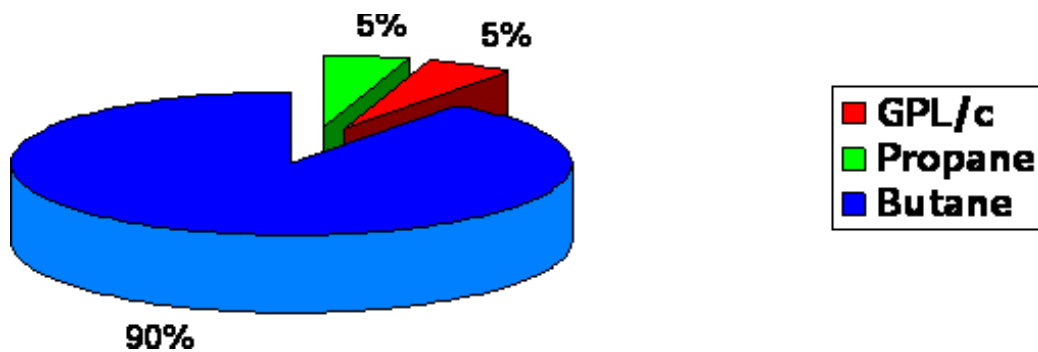


Figure I.1: La demande nationale de GPL.

I.5. LES RISQUES ASSOCIÉS AUX GAZ DE PÉTROLE LIQUÉFIÉ (GPL)

Les principaux risques liés à l'utilisation et au stockage des GPL sont les suivants :

I.5.1. Stockage sous pression

Les GPL sont généralement stockés à l'état liquide sous pression. En cas de fuite, l'évaporation rapide du liquide génère un volume important de gaz inflammable.

I.5.2. Inflammabilité élevée

La limite inférieure d'inflammabilité du GPL est d'environ 2 % de son volume dans l'air. Une faible concentration de gaz dans l'air peut former un mélange inflammable, susceptible de s'enflammer au contact d'une source de chaleur ou d'une étincelle, même éloignée du point de fuite.

I.5.3. Risque de brûlures thermiques

Lors de l'évaporation du liquide, le refroidissement brutal de l'environnement peut provoquer des brûlures sévères par contact avec le produit ou ses vapeurs.

I.5.4. Mesures de protection

Il est indispensable de porter des équipements de protection individuelle (EPI) adaptés lors des manipulations :

- ❖ Gants isolants.
- ❖ Lunettes de sécurité.
- ❖ Vêtements de protection adaptés aux risques cryogéniques et aux projections de gaz.

I.6. LES INSTALLATIONS DU COMPLEXE GP1/Z

Le Complexe GP1Z est constitué de plusieurs Installations qui sont comme suites :

- ❖ Les installations de Production GPL.
- ❖ Les installations de Stockage des Produits Finis.
- ❖ Les installations de Chargement.
- ❖ Les installations d'Utilité.
- ❖ Les installations de stockage d'alimentation.

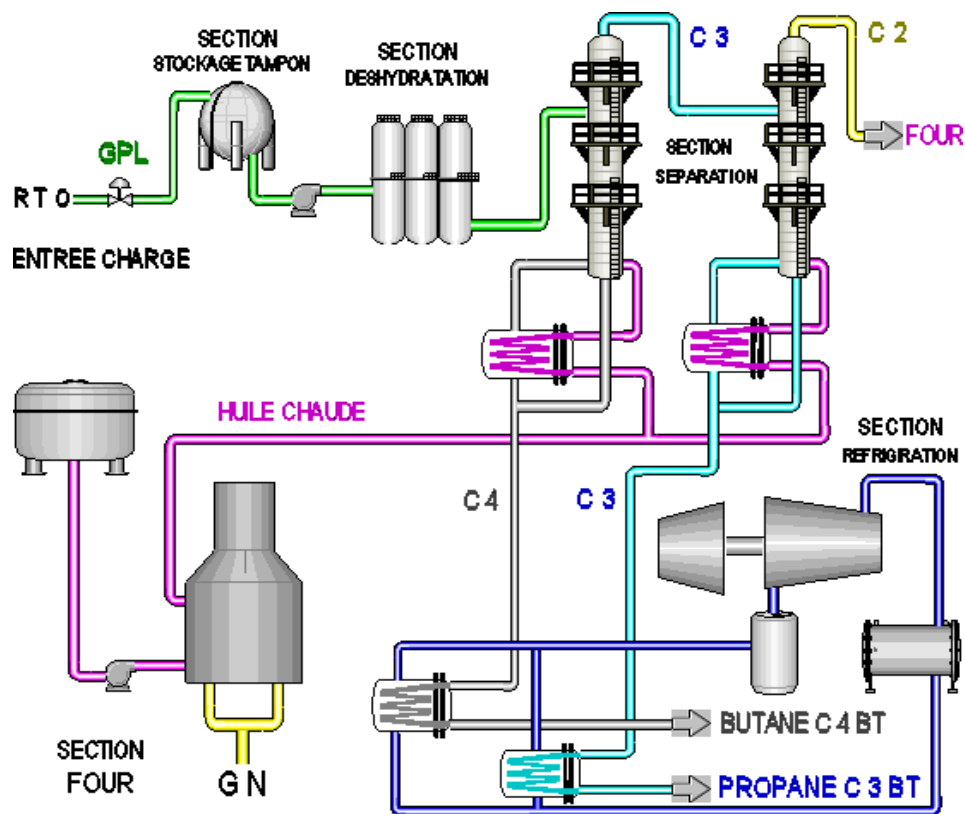


Figure I.2: Schéma de procédé de liquéfaction du GPL.

I.6.1. Les Installations de Production

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. Chaque train est conçu de manière à produire 10.800.000 de tonnes/an et comprend les sections suivantes [3,4] :

I.6.1.1. Section de Déshydratation

Cette section a pour rôle d'éliminer l'humidité contenue dans le GPL d'alimentation, en utilisant des tamis moléculaires capables d'adsorber les molécules d'eau. Cette étape est essentielle pour prévenir le risque de givrage dans la section de réfrigération.

I.6.1.2. Section de Séparation du GPL

Cette section assure la séparation du GPL brut en différents produits commerciaux : propane (C3), butane (C4) et éventuellement pentane (C5), en atteignant un taux de récupération optimal. Le paramètre déterminant pour le fonctionnement de cette section est la composition du GPL brut. Le processus de séparation s'organise comme suit [3] :

I.6.1.2.1. Le Fractionnement

Il réalise la séparation principale entre le produit de tête (propane et éthane) et le produit de fond (butane et pentane).

- Température d'entrée : 71°C
- Pression moyenne dans la colonne : 20 kg/cm²

I.6.1.2.2. Le Dééthaniseur

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.

- Température d'alimentation (liquide sous-refroidi) : 50°C
- Pression de fonctionnement : 22 kg/cm²

I.6.1.2.3. Le 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%.

- Température d'alimentation : 60°C
- Pression d'alimentation : 7 kg/cm²

I.6.1.3. Section de Réfrigération

Destinée à abaisser la température des produits commerciaux (propane et butane) jusqu'à leur point de saturation liquide avant stockage. Cette section utilise un cycle de réfrigération fermé au propane, comportant trois échangeurs assurant le refroidissement successif des produits.

I.6.1.4. Section d’Huile Chaude

Cette section assure l’alimentation thermique des rebouilleurs et du préchauffeur final du fractionnateur. Le four de fluide caloporteur fournit également la chaleur nécessaire au gaz de régénération utilisé dans la section de déshydratation [3].

- Température d’entrée de l’huile dans le four : 130°C
- Température de sortie : 180°C.

I.7. SECTION DÉSHYDRATATION DE CHARGE

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 adsorbeurs, si bien qu'une colonne peut être révisée, pendant que les deux autres assurent l'adsorption de la charge (voir l’annexe 01).

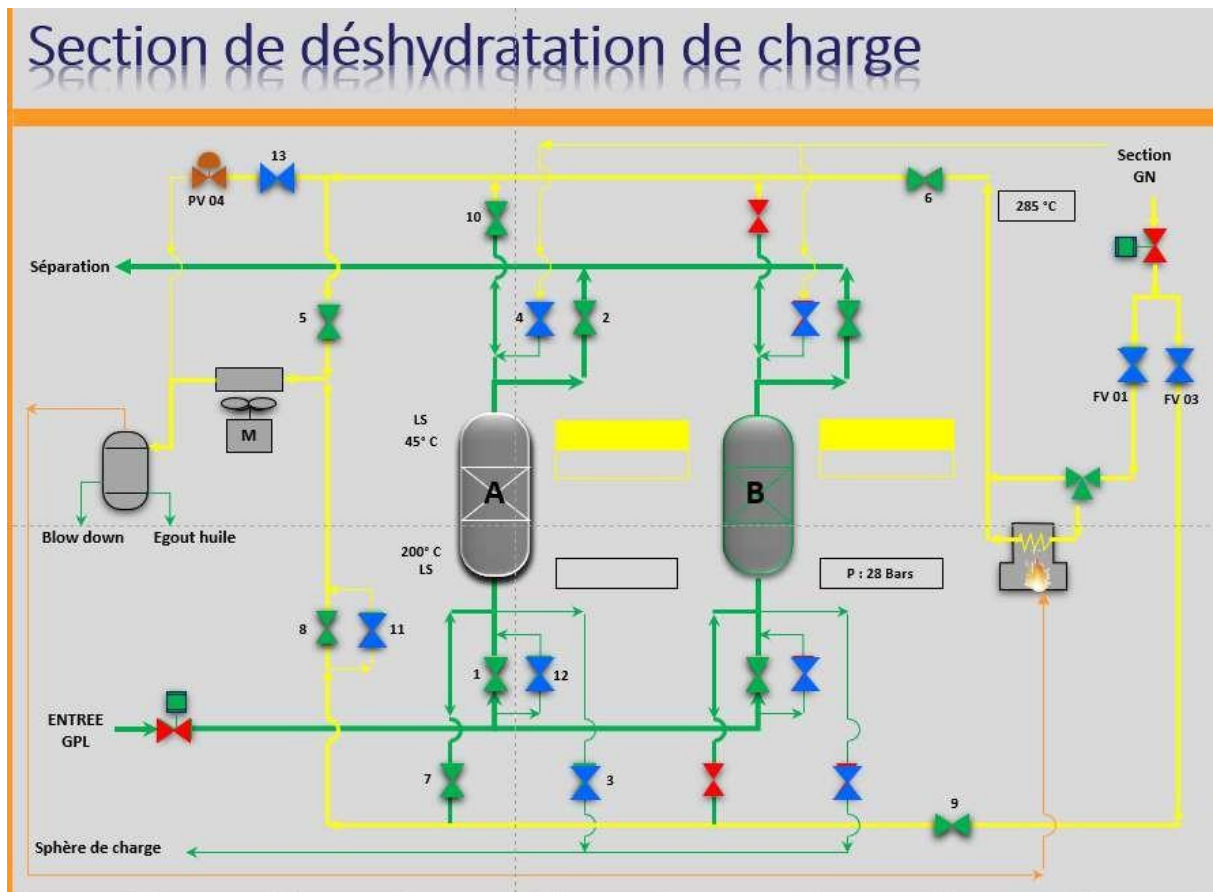


Figure I.3: schéma de la section déshydratation.

I.7.1. Les modes de déshydratation

Il existe plusieurs méthodes pour réduire la teneur en eau contenue dans le GPL, visant principalement à éviter la formation d'hydrates et les phénomènes de corrosion. Ces procédés de déshydratation peuvent être classés en trois grandes catégories [4,5] :

- ❖ **L'inhibition** : consiste à injecter un inhibiteur de formation d'hydrates afin de prévenir leur apparition dans le système.
- ❖ **La déshydratation par absorption** : procédé utilisant un liquide absorbant pour extraire l'eau contenue dans le GPL.
- ❖ **La déshydratation par adsorption** : réalisée au moyen d'un agent desséchant solide activé, capable de capter et retenir les molécules d'eau présentes dans le gaz.

Le choix de la méthode appropriée dépend des caractéristiques du gaz à traiter, des contraintes d'exploitation et des performances recherchées.

I.7.2. Déshydratation par Absorption dans un Liquide

La déshydratation par absorption repose sur l'utilisation d'un liquide absorbant capable de capturer l'eau contenue dans le gaz ou le GPL. Pour être efficace et économiquement viable, ce liquide doit présenter un certain nombre de caractéristiques essentielles :

- ❖ Une forte affinité pour l'eau.
- ❖ Être non corrosif et peu onéreux.
- ❖ Présenter une bonne stabilité thermique et chimique, ainsi qu'une régénération aisée.
- ❖ Posséder une faible pression de vapeur à la température de contact afin de limiter les pertes par évaporation.
- ❖ Avoir une faible viscosité et une faible tendance à la formation de mousse.

Deux composés organiques répondent particulièrement bien à ces critères : le diéthylène glycol (DEG) et le triéthylène glycol (TEG), qui sont largement utilisés dans les unités de déshydratation par absorption.

I.7.3. Déshydratation par Adsorption sur un Solide

L'adsorption est une opération physique de séparation qui intervient lorsqu'un fluide entre en contact avec un solide. Ce phénomène se manifeste par une différence de concentration entre le fluide à proximité immédiate de la surface du solide et le reste de la phase fluide.

L'étude des équilibres d'adsorption permet de déterminer la capacité maximale de séparation atteignable dans des conditions thermodynamiques données. Par ailleurs, la cinétique d'adsorption, qui mesure la vitesse d'approche de l'état d'équilibre, dépend de la diffusion des constituants du mélange dans le solide et dans le fluide, ainsi que des conditions opératoires. Elle conditionne directement l'efficacité de l'appareillage utilisé.

Ce phénomène est spontané et toujours exothermique. En fonction de l'énergie mise en jeu, l'adsorption est classée en deux catégories :

- **Adsorption physique**, lorsque les forces d'attraction sont de faible intensité (forces de Van der Waals).
- **Adsorption chimique**, lorsque les interactions sont plus fortes et résultent de liaisons chimiques.

I.7.3.1. Les Adsorbants

Dans les procédés de déshydratation des gaz et des fluides, plusieurs agents desséchants sont couramment utilisés. Les plus importants sont le silicagel, l'aluminagel, l'alumine activée, le charbon actif et les tamis moléculaires. Ces adsorbants agissent principalement par un mécanisme physique. Ce mécanisme repose sur des forces de cohésion déséquilibrées présentes à la surface des solides, qui génèrent une faible attraction envers les molécules circulant dans un fluide. Cette attraction, comparable à un effet magnétique, favorise l'adhésion des molécules à la surface de l'adsorbant.

Deux phénomènes supplémentaires influencent également l'adsorption de surface. Premièrement, les forces d'adsorption ont tendance à se concentrer dans les zones où la surface présente des courbures, telles que les pores ou les cavités. Deuxièmement, lorsque le diamètre de ces pores devient comparable à celui des molécules à adsorber, les effets de condensation s'accroissent, ce qui renforce la capacité d'adsorption du matériau.

Les caractéristiques des principaux adsorbants utilisés sont les suivantes :

I.7.3.1.1. Silicagel

Disponible sous forme de poudre ou de granulés de différentes tailles, le silicagel est un matériau amorphe et très poreux dont les pores ont un diamètre moyen de 40 Å. Sa formule chimique est $(\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$. Il offre la plus grande capacité d'adsorption d'eau parmi les adsorbants classiques, pouvant atteindre 40 kg H_2O pour 100 kg de silicagel, et permet d'atteindre un point de rosée de -60°C (10 ppm v).

I.7.3.1.2. Alumine Activée

Il s'agit d'une forme amorphe, poreuse et partiellement hydratée de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). Sa capacité d'adsorption est légèrement inférieure à celle du silicagel, mais elle permet de descendre à un point de rosée plus bas, de l'ordre de -75°C (1 ppm v H_2O), ce qui la rend particulièrement adaptée pour les applications nécessitant un séchage poussé.

I.7.3.1.3. Aluminagel

L'Aluminagel présente des performances de déshydratation similaires à celles du silicagel, capable de réduire la teneur en eau à un point de rosée de -60°C (10 ppm v). Toutefois, ses capacités restent inférieures à celles de l'alumine activée.

I.7.3.1.4. Charbon Actif

Principalement utilisé pour l'adsorption des hydrocarbures et des composés organiques, le charbon actif est aussi employé pour la récupération de solvants. Il est fabriqué à partir de différentes matières premières, telles que les coquilles de noix ou le charbon, et est activé par traitement thermique en absence d'air. Ce matériau est disponible sous forme de granulés et peut être régénéré à des températures ne dépassant pas 150°C .

I.7.3.1.5. Tamis Moléculaire

Les tamis moléculaires sont des aluminosilicates cristallisés présentant une structure poreuse aux diamètres de pores parfaitement définis. Ils sont capables d'adsorber environ 10 % de leur poids en eau et sont particulièrement adaptés aux procédés nécessitant un contrôle précis de la taille moléculaire et des conditions de déshydratation très strictes (Voir annexe 02).

I.8. LES HYDRATES

I.8.1. Définition

Les hydrates sont des composés solides qui se forment par l'association physique entre l'eau et certains hydrocarbures légers ou impuretés gazeuses. Ils se présentent sous forme de cristaux ressemblant à de la glace, bien qu'ils possèdent une structure moléculaire différente de celle de la glace ordinaire [5].

I.8.2. Les conditions de formation des hydrates

La formation des hydrates est favorisée par un ensemble de conditions regroupées en deux catégories [5] :

I.8.2.1. Les conditions primaires

- ❖ Présence d'eau libre dans le gaz.
- ❖ Température basse, inférieure au seuil de formation des hydrates.
- ❖ Pression élevée.
- ❖ Gaz à ou en dessous de son point de rosée eau.

I.8.2.2. Les conditions secondaires

- ❖ Vitesses d'écoulement élevées favorisant les mélanges et les turbulences.
- ❖ Présence d'un germe ou cristal initial d'hydrate.
- ❖ Existence de sites physiques propices à la formation, tels que les parois internes de tuyauteries, les orifices ou les zones à géométrie réduite.

I.9. LES TAMIS MOLECULAIRES

Les tamis moléculaires (voir l'annexe 02) se distinguent des adsorbants traditionnels par leur capacité à retenir sélectivement les petites molécules tout en excluant celles de taille supérieure. Cette spécificité permet de réaliser des séparations basées essentiellement sur la différence de diamètre moléculaire. Le choix du type de tamis adapté à chaque application se fait à partir des dimensions moléculaires des composants à traiter, comme indiqué dans le tableau (I.2).

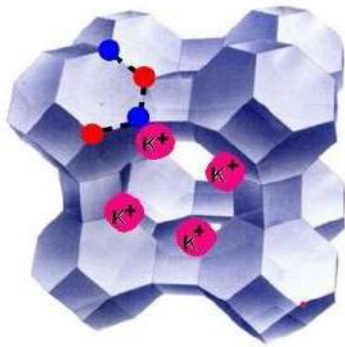
Tableau I.2: diamètres critiques de certaines molécules [6]

| 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 |
| Éthanol | 4,4 |
| Mercaptan méthylique | 4,5 |
| Propane | 4,9 |
| Propylène | 5,0 |
| Mercaptan éthylique | 5,1 |
| Butène | 5,1 |
| 1,3-Butadiène | 5,2 |
| Chlorodifluorométhane (R-22) | 5,3 |
| Thiophène | 5,3 |
| i-Butane à 1-C22 H46 | 5,6 |
| Dichlorodifluorométhane | 5,7 |
| Cyclohexane | 6,1 |
| Benzène | 6,7 |
| Toluène | 6,7 |
| P-Xylène | 6,7 |
| M-Xylène | 7,1 |
| O-Xylène | 7,4 |
| Triéthylamine lamine | 8,4 |

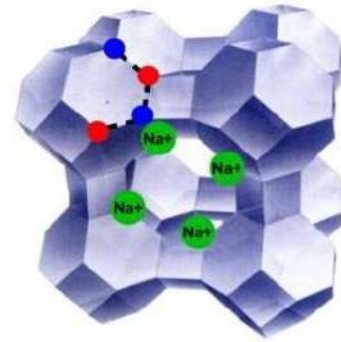


Figure I.4: Tamis moléculaire sous ses différentes formes.

Les tamis moléculaires, principalement constitués de zéolithes de type A ou X, sont des aluminosilicates cristallins dotés d'une structure microporeuse hautement régulière. Leur réseau de cavités interconnectées, formé par des tétraèdres SiO_4 et AlO_4^- , présente des pores dont la taille (3-10 Å) peut être finement ajustée par échange cationique (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}). Ces matériaux s'activent par simple chauffage, qui élimine l'eau résiduelle sans altérer leur structure, révélant ainsi une surface interne considérable (600-700 m^2/g). Leur adsorption repose sur deux mécanismes clés : la condensation capillaire dans les micropores et les interactions électrostatiques avec les molécules polaires, comme l'eau. Cette double action leur confère des performances supérieures aux adsorbants traditionnels (gel de silice, alumine), avec une capacité exceptionnelle même à très faible pression partielle (jusqu'à 1 ppm). Leur stabilité thermique et chimique, couplée à une régénération aisée par désorption thermique, en fait des solutions durables pour la purification de gaz, le séchage de solvants ou la séparation moléculaire en pétrochimie. Leur comportement est quantifié par des isothermes d'adsorption décrivant précisément leur efficacité en fonction des conditions opératoires.



Tamis moléculaire 3A



Tamis moléculaire 4A

Figure I.5: Les tamis moléculaires 3A et 4A.

Les principaux atouts et contraintes de l'utilisation des tamis moléculaires en déshydratation se résument ainsi :

- Ils permettent d'atteindre de très faibles concentrations résiduelles en eau.
- Moins adaptés aux grands débits de charge en raison de la nature discontinue du procédé.
- Leur capacité d'adsorption reste élevée même à basse teneur en eau.
- Leur efficacité est affectée par la présence de certaines impuretés, notamment le COS et le CS₂, qui peuvent endommager le matériau.
- Le coût de l'adsorbant reste élevé et un remplacement est généralement requis tous les trois ans.

I.9.1. Type et Dimension du Tamis Moléculaire

Dans les unités de traitement du GPL, le tamis moléculaire le plus couramment employé pour la déshydratation est le type 4Å. Ce dernier est capable d'adsorber efficacement les molécules dont le diamètre cinétique est inférieur à 4 angströms, telles que le sulfure d'hydrogène (H₂S), le dioxyde de carbone (CO₂), l'éthane ainsi que les hydrocarbures légers. En revanche, les molécules de dimensions supérieures sont exclues de la structure microporeuse.

Afin d'optimiser les performances d'adsorption, les installations privilégient l'utilisation de tamis sous forme de granulés. Les granulés de petit diamètre offrent en effet une surface spécifique plus importante par unité de volume, favorisant ainsi le transfert de masse et améliorant l'efficacité globale du procédé

I.9.2. Régénération des Tamis Moléculaires

Les tamis moléculaires perdent progressivement leur capacité d'adsorption en raison de la saturation de leurs pores. Pour restaurer leurs performances, trois méthodes principales sont employées : régénération thermique, dépressurisation, ou une combinaison des deux.

I.9.2.1. Régénération thermique :

Un gaz chaud (200–300°C) est injecté pour désorber les molécules piégées, souvent combiné à une réduction de pression pour optimiser l'efficacité.

La chaleur nécessaire doit compenser :

Le chauffage du lit adsorbant et de la colonne.

L'énergie de désorption des molécules (eau, CO₂, hydrocarbures).

Les pertes thermiques.

Pour éviter la formation de coke (avec les hydrocarbures lourds), une purge par gaz inerte est recommandée avant chauffage.

Après régénération, le lit est refroidi pour retrouver ses conditions opératoires.

I.9.2.2. Régénération par dépressurisation :

Basée sur la réduction de la pression partielle de l'adsorbat, ce qui déplace l'équilibre d'adsorption et libère les molécules.

Souvent couplée à la régénération thermique pour améliorer l'efficacité.

Ces méthodes permettent une réutilisation cyclique des tamis sans altération structurelle, essentielle pour les applications industrielles (séchage de gaz, purification, pétrochimie). La régénération thermique est la plus courante, tandis que la dépressurisation est utile pour des systèmes sensibles à la température.

CHAPITRE II: Partie Pratique**II.1. INTRODUCTION**

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

Un bilan thermique.

Un bilan de matière.

Les bilans thermiques et matière sont les parties essentielles de notre travail, où on va évaluer la quantité de chaleur et le débit de GN nécessaires à la régénération du sécheur. Avant toute application, nous nous assurons de la fiabilité de la méthode adoptée par la suite dans un sous- titre « Validation de méthode » où les calculs seront faits pour un déshydrateur de charge fonctionnant selon le design.

II.2. CONSTITUTION D'UN DÉSHYDRATEUR DE CHARGE

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 [7,9]. Le tableau (II.1) regroupe les caractéristiques des tamis moléculaire.

Tableau II.1: La fiche technique du tamis moléculaire.

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

II.2.1. Les conditions opératoires d'adsorption / désorption (cas réel)

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

II.2.2. Température d'entrée du gaz de régénération

- ❖ Réchauffage T = 290°C.
- ❖ Refroidissement T = 12.7°C.

II.3. LA THÉORIE DE CALCUL

II.3.1. Le bilan énergétique

II.3.1.1. Calcul de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération

La quantité de chaleur nécessaire à la régénération [13] est :

$$Q_{\text{totale}} = Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}} + Q_{\text{des}} + Q_{\text{perte}} \dots\dots\dots \text{(II.1)}$$

Q_{tamis}: La chaleur nécessaire au réchauffage du tamis de la température

D'adsorption à La température de désorption (BTU).

Q_{acier}: La chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier de la température d'adsorption

La température de désorption (BTU).

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

Q_{perte} : Considérées comme étant égales à 10% de la somme

$$(Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des}) \text{ (BTU) } \dots\dots\dots \text{(II.2)}$$

II.3.1.2. Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption de l'eau Q_{des}

La chaleur de désorption de l'eau est donnée par la formule suivante :

$$Q_{des} = M_{ads} \times \Delta H \dots\dots\dots \text{(II.2)}$$

ΔH : La chaleur spécifique de désorption de l'eau (BTU/ Lb).

II.3.1.3. Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis Q_{tamis}

$$Q_{tamis} = m_t \times C_{p_t} \times (T - T_{ads}) \dots\dots\dots \text{(II.3)}$$

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

C_{p_t} : La capacité calorifique du tamis (BTU/ Lb. °F).

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

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

II.3.1.4. Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier Q_{acier}

$$Q_{acier} = m_c \times C_{p_c} \times (T - T_{ads}) \dots\dots\dots \text{(II.4)}$$

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

C_{p_c} : La capacité calorifique de l'acier (BTU / lb. °F).

II.3.1.5. Calcul des pertes de chaleur Q_{perte}

$$Q_{perte} = 0.1 \times (Q_{des} + Q_{tamis} + Q_{acier}) \dots\dots\dots \text{(II.5)}$$

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

II.3.1.6. Calcul de la température du lit « T »

On peut l'obtenir par la relation suivante [13] :

$$T = T_s - \frac{(T_e - T_s)}{2} \dots\dots\dots \text{(II.6)}$$

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

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

II.3.1.7. Calcul de la chaleur H_f fournie par le four

$$H_f = \frac{Q_{\text{totale}}}{(1/\epsilon)} \dots\dots\dots \text{(II.7)}$$

$\frac{1}{\epsilon}$: Le efficacité thermique de four.

II.3.1.8. Calcul du temps de réchauffage du tamis « t_r »

$$t_r = \frac{H_f}{(\Delta H_{(T_i - T_e)} \times M_g)} \dots\dots\dots \text{(II.8)}$$

M_g : Le débit du gaz de chauffage (Nm^3/hr).

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

t_r : Le temps de chauffage (hr).

II.3.1.9. Calcul de la chaleur fournie par le four par H_f /cycle

$$H_{f/\text{cycle}} = \frac{(3 \times H_f \times t_r)}{\text{cycle}} \dots\dots\dots \text{(II.9)}$$

Et on a

$$\text{cycle} = 3 \times t_{\text{ads}} \dots\dots\dots \text{(II.10)}$$

Donc :

$$H_{\frac{f}{\text{cycle}}} = \frac{(H_f \times t_r)}{t_{\text{ads}}} \dots\dots\dots \text{(II.11)}$$

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

II.3.1.10. Calcul du temps de refroidissement du tamis « t_{ref} »

$$t_{ref} = \left(\frac{Q_{tamis} + Q_{acier}}{Q_{totale}} \right) \times t_r \dots\dots\dots (II.12)$$

II.3.1.11. Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{Ref}

$$Q_{ref} = \frac{(Q_{tamis} + Q_{acier})}{t_{ref}} \dots\dots\dots (II.13)$$

II.3.2. Le bilan de matière de la régénération

II.3.2.1. Calcul du débit du gaz de refroidissement

Le débit du gaz de refroidissement est calculé comme suit :

$$M_{ref} = \frac{Q_{ref}}{\Delta H_{(T_s - T_e)}} \dots\dots\dots (II.14)$$

$\Delta H_{(T_s - T_e)}$: La différence de l'enthalpie du gaz (BTU / Nm³) de refroidissement

M_{ref} : Le débit du gaz de refroidissement (Lb/ h).

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

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

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.

II.3.3. Calcul de la chute de pression

La perte de charge par unité de longueur est donnée par l'équation modifiée [13] :

$$\frac{\Delta P}{L} = A \times \mu \times U + (B \times \rho_{GN} \times U^2) \dots\dots\dots (II.15)$$

Où :

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

μ : la viscosité du GN (Cp).

ρ_{GN} : la masse volumique du GN (Lb/ ft³).

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

$$A = 0.0561, B = 0.0000889.$$

II.3.4. Calcul du nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est calculé par la formule suivante :

$$Re = \frac{(G \times D_p)}{\mu} \dots\dots\dots (II.16)$$

II.4. VALIDATION DE MÉTHODE

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

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

Nous reprendrons essentiellement le calcul de la quantité de chaleur nécessaire à la régénération ainsi que le débit approprié. Avec les Propriété du GPL :

- ✓ Débit de traitement à 100% : $Q = 240 \text{ m}^3 / \text{h} = 127,2 \text{ t} / \text{h}$
- ✓ $P = 30.7 \text{ Kg} / \text{cm}^2$
- ✓ $T = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298.15 \text{ }^\circ\text{K}$.

II.4.1. Composition de la charge du GPL

Tableau II.2: composition de la charge du GPL

| COMPOSANT | Mi g/mole | Yi (% molaire) | Yi * Mi |
|-----------|-----------|----------------|--------------|
| C1 | 16,043 | 0,24 | 0,04 |
| C2 | 30,070 | 1,92 | 0,58 |
| C3 | 44,097 | 59,37 | 26,18 |
| i-C4 | 58,123 | 13,68 | 7,95 |
| n-C4 | 58,123 | 24,54 | 14,26 |
| i-C5 | 72,150 | 0,20 | 0,14 |
| n-C5 | 72,150 | 0,05 | 0,04 |
| | | MGPL | 49,19 |

Poids moléculaire du GPL : $M_{GPL} = \sum(Mi \times Yi)$(II.17)

$$M_{GPL} = 49.19 \text{ Kg/Kmole}$$

- ✓ Solubilité de l'eau dans le GPL à T=25°C (voir Annexe 02)
- ✓ Teneur en eau à l'entrée du sécheur : $X_E = 100 \text{ ppm}$.
- ✓ Teneur en eau à la sortie du sécheur : $X_S = 1 \text{ ppm}$.
- ✓ Phase : liquide
- ✓ Masse volumique du GPL : $\rho_{GPL} = 530 \text{ Kg / m}^3 = 33.09 \text{ Lb / ft}^3$.

II.5. DIMENSIONNEMENT D'UN DESHYDRATEUR

II.5.1. Calcul de la quantité d'eau adsorbée

II.5.1.1. Diamètre minimum du lit

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

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \times (\rho_{GPL} \times Q)}{\pi \times G}} \dots\dots\dots \text{(II.18)}$$

D_{\min} : diamètre minimum du lit de tamis (ft).

ρ_{GPL} : masse volumique de la charge (lb/ ft³).

Q : débit volumique de la charge (ft³ / h).

G : vitesse massique de l'écoulement de fluide (lb /ft² .h).

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

$$G = 3600 \times \sqrt{C \times \rho_{\text{tamis}} \times \rho_{GPL} \times D_p} \dots\dots\dots \text{(II.19)}$$

D_p : diamètre moyen des particules du tamis (ft).

ρ_{Tamis} : masse volumique du dessiccant (lb/ ft³)

C : constante relative aux tamis moléculaire ($C = g \times 0.03291925 = 1.06\text{ft}/\text{sec}^2$)

II.5.1.1.1. Application Numérique

$$D_p = 0.01\text{ft}$$

$$\rho_{\text{tamis}} = 640\text{kg}/\text{m}^3 = 39.95\text{Lb}/\text{ft}^3$$

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

$$G = 32.2\text{ft}/\text{sec}^2$$

$$C = 1.06$$

$$G = 13476.03\text{Lb}/\text{ft}^2$$

$$D_{\min} = 5.2\text{ft} = 1.58\text{m}$$

II.5.1.2. La hauteur totale du lit

La hauteur totale du lit est donnée par l'équation suivante [13] :

$$H_t = H_s + H_z \dots\dots\dots (II.20)$$

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

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

II.5.1.3. Calcul de la vitesse actuelle d'écoulement de fluide (U_{act})

$$U_{act} = \frac{Q}{S} \dots\dots\dots (II.21)$$

Avec

$$S = \frac{(\pi \times D_{min}^2)}{4} \dots\dots\dots (II.22)$$

$$S = 21.30ft^2$$

$$U_{act} = 407.29ft/h = 6.79ft/min$$

II.5.1.4. Calcul le débit d'eau

$$q_w = \frac{(4 \times Y_{IN} \times \rho_{GPL} \times Q)}{(\pi \times D_L^2)} \dots\dots\dots (II.23)$$

$$q_w = 0.77Lb/ft^2 \times hr$$

II.5.1.5. Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse

$$H_z = \frac{225 \times q_w^{0.7895}}{U_{act}^{0.5506} \times Y_{IN}^{0.2646}} \dots\dots\dots (II.24).$$

$$H_z = 18.86inch = 1.57ft = 0.48m$$

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

q_w : quantité d'eau dans le gaz par unité de surface du déshydrateur [lb/hr.ft²]

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

U_{act} : vitesse superficielle du gaz [ft/mn].

II.5.1.6. Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre

$$H_s = 4.33\text{ft} = 1.32\text{m}$$

H_t : la hauteur totale du lit ($H_t = 1.8 \text{ m} = 5.9 \text{ ft}$).

H_z : la hauteur de la zone de transfert de masse.

II.5.2. Estimation de la capacité d'adsorption à l'équilibre

La capacité d'adsorption est de 22 Lb d'eau / Lb de tamis moléculaire qui représente la saturation complète du tamis moléculaire [13],

$$X_s = (22 - X_1) \dots \dots \dots \text{(II.26)}$$

X_1 : la teneur en eau résiduelle, $X_1 = 1.5 \%$ 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 :

$$\text{Coefficient d'usure} = 70 \%$$

La capacité sera en fin de compte égale à :

Alors :

$$X_s = 14.35 \text{Lbd'eau}/100\text{Lbadsorbant}$$

II.5.2.1. Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de l'adsorbant (X)

$$X = X_s \times [1 - (C \times (\frac{H_z}{H_s}))] \dots \dots \dots \text{(II. 27)}$$

$$X = 12.01 \text{Lb d'eau}/100\text{Lbadsorbant}$$

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

II.5.2.2. Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ad}

$$M_{ads} = \frac{H_t - (C \times H_z) \times (X_s \times D_L^2 \times \rho_{tamis})}{127.38} \dots \dots \dots \text{(II.28)}$$

$$M_{ads} = 1.11 \times 10^3 \text{Lb}$$

II.5.2.3. Calcul du temps d'adsorption

$$t_{ads} = \frac{0.01 \times X \times H_r \times \rho_{tamis}}{q_w} \dots\dots\dots (II.29)$$

$$t_{ads} = 36.80hr$$

II.5.2.4. Détermination de l'efficacité d'adsorption

$$EFF = \frac{x}{x_s} \times 100 \dots\dots\dots (II.30)$$

$$EFF = 83.68$$

II.6. CALCUL DU BILAN THERMIQUE

II.6.1. Propriété du gaz de régénération

Le tableau (II.3) regroupe la composition du gaz régénération dans le cas réel [12].

.

Le tableau II.3: La composition du gaz de régénération

| Composant | X_i en mole | T_{ref} (K)=12.7°C | T_{rec} (K)=280°C | ΔH° (Kj/Kg) | M_i (Kg/Kmole) | X_i % en poids | ΔH° *X_i (Kj/Kg) |
|------------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| C₁ | 0.8386 | 285.85 | 553.15 | 698.30 | 16 | 0.72 | 500.69 |
| C₂ | 0.0743 | 285.85 | 553.15 | 599.60 | 30 | 0.12 | 71.42 |
| C₃ | 0.0186 | 285.85 | 553.15 | 586.64 | 44 | 0.04 | 25.66 |
| i-C₄ | 0.0026 | 285.85 | 553.15 | 591.34 | 58 | 0.01 | 4.77 |
| n-C₄ | 0.0008 | 285.85 | 553.15 | 592.58 | 58 | 0.00 | 1.47 |
| i-C₅ | 0.004 | 285.85 | 553.15 | 585.59 | 72 | 0.02 | 9.01 |
| n-C₅ | 0.0009 | 285.85 | 553.15 | 586.78 | 72 | 0.00 | 2.03 |
| C₆ | 0.0003 | 285.85 | 553.15 | 589.15 | 86 | 0.00 | 0.81 |
| N₂ | 0.0557 | 285.85 | 553.15 | 280.49 | 28 | 0.08 | 23.38 |
| CO₂ | 0.0024 | 285.85 | 553.15 | 253.63 | 44 | 0.01 | 1.43 |
| He | 0.0018 | 285.85 | 553.15 | 0.00 | 4 | 0.00 | 0.00 |
| Total | 1 | | | | 18.71 | 1.00 | 640.66 |

Poids moléculaire du GN d'après l'équation (II.17) :

$$M_{GN} = 18.71 \text{ kg/kmole}$$

Le gaz naturel de Réchauffage :

$$T = 280 \text{ °C} = 553.15 \text{ °K}$$

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

Le gaz naturel de Refroidissement :

$$T = 12.7 \text{ °C} = 285.85 \text{ °K}$$

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

II.6.2. Calcul de la masse volumique du GN dans les conditions normal ρ_{GN}

$$\rho_{GN} = \frac{P \times M_{GN}}{Z \times R \times T} \dots\dots\dots (II.31)$$

$$T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}, P = 1 \text{ atm.}$$

$$Z = 1.$$

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

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

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

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

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

II.6.3. Calcul de l'enthalpie de chauffage du gaz de 12.7°C à 280°C

$$\Delta H = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5 \dots\dots\dots (II.32)$$

$$T = T_{rech} - T_{ref} \dots\dots\dots (II.33)$$

ΔH : l'enthalpie qui fournit par le four exprimé en (KJ / Kg) [5], Tableau (II.3).

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 corrélation (voir l'annexe 3).

$$\Delta H = 640.66 \text{ kJ/kg} = 2.75 \times 10^2 \text{ Btu/Lb}$$

II.6.4. Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q_{tamis}

II.6.4.1. Calcul de la masse du tamis m_t

$$m_t = \frac{\pi \times D_t^2 \times H_t \times \rho_{tamis}}{4} \dots\dots\dots (II.34)$$

$$D_t = 2.1 \text{ m} = 6.89 \text{ ft}$$

$$H_t = 2.1 \text{ m} = 6.89 \text{ ft}$$

$$\rho_{\text{tamis}} = 640 \text{ kg/m}^3 = 39.95 \text{ Lb./ft}^3$$

$$M_t = 10259.01 \text{ Lb} = 4652.61 \text{ kg}$$

II.6.4.2. Calcul de la température moyenne du lit en fin de chauffage

D'après l'équation (II.6) :

$$T = 200.50^\circ\text{C} = 392.90^\circ\text{F} = 473.65^\circ\text{K}$$

$$t_{\text{ads}} = 25^\circ\text{C} = 77^\circ\text{F}$$

$$m_t = 10259.01 \text{ Lb}$$

$$C_{pT} = 0.22 \text{ BTU/ Lb } ^\circ\text{f}$$

$$T = 200.5^\circ\text{C} = 392.90^\circ\text{F} = 473.65^\circ\text{K}$$

D'après l'équation (II.3) :

$$Q_{\text{tamis}} = 7.13 \times 10^5 \text{ Btu}$$

II.6.5. Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage de l'acier

II.6.5.1. Calcul du volume de l'acier (V_c)

$$V_c = (S_{\text{ext}} - S_{\text{int}}) \times L \dots\dots\dots \text{(II.35)}$$

Avec :

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

S_{ext}: La surface externe de la paroi du sécheur (ft²).

S_{int}: La surface interne de la paroi du sécheur (ft²)

L: La hauteur de la colonne (ft)

$$V_c = \frac{\pi \times [(d + (2 \times E_p))^2 - d^2] \times L}{4} \dots\dots\dots \text{(II.36)}$$

$$V_c = \pi \times L \times [E_p \times (d + E_p)] \dots\dots\dots \text{(II.37)}$$

E_p: L'épaisseur de l'acier.

$$E_p = 36.8 \text{ mm} = 0.12 \text{ ft}$$

d: Le diamètre de l'acier.

$$d = 2100 \text{ mm} = 6.89 \text{ ft}$$

$$L = 4630\text{mm} = 15.19\text{ft}$$

$$V_c = 40.37\text{ft}^3 = 1.14\text{m}^3$$

II.6.5.2. Calcul de la masse de l'acier m_c

$$m_c = V_c \times \rho_{\text{acier}} \dots\dots\dots (\text{II.38})$$

ρ_{acier} : La masse volumique de l'acier (Lb / ft³).

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

$$\rho_{\text{acier}} = 500 \text{ Lb / ft}^3$$

$$m_c = 2 \times 10^4 \text{ Lb}$$

En ajoutant la quantité d'acier relatives aux supports, aux pipes et aux brides estimées à 35% (accessoires).

Donc : $m_c = 2.73 \times 10^4 \text{ Lb}$

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

$$m_c = 2.73 \times 10^4 \text{ lb.}$$

$$C_{p_c} = 0.12 \text{ BTU / Lb.}^\circ\text{F.}$$

D'après l'équation (II.4) :

$$Q_{\text{acier}} = 1.03 \times 10^6 \text{ Btu}$$

II.6.5.3. Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}

La quantité d'eau adsorbée $M_{\text{ads}} = 1.11 \cdot 10^3 \text{ Lb.}$

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

D'après l'équation (II.4) :

$$Q_{\text{des}} = 2 \times 10^6 \text{ Btu}$$

II.6.5.4. Calcul des pertes de chaleur Q_{perte}

$$Q_{\text{des}} = 2.10^6 \text{ BTU.}$$

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

$$Q_{\text{tamis}} = 7.13 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

D'après l'équation (II.5) :

$$Q_{\text{pertes}} = 3.74 \times 10^5 \text{ Btu}$$

II.6.5.5. Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale}

D'après l'équation (II.1) :

$$Q_{\text{totale}} = 4.12 \times 10^6 \text{ Btu}$$

II.6.5.6. Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage H_f

II.6.5.6.1. Calcul de l'efficacité thermique du four $1/\varepsilon$

Efficacité thermique du four pendant le réchauffage [8] :

$$\varepsilon = 2.25 + (0.03113 \times T) \dots\dots\dots \text{(II.39)}$$

T: Temps de chauffage (h).

$$\varepsilon = 2.59$$

$$\frac{1}{\varepsilon} = 0.39$$

D'après l'équation (II.7) : à partir le tableau (II.1) :

II.6.5.7. Calcul de l'énergie totale fournie par le four

II.6.5.7.1. Calcul de la chaleur totale fourni par le four lors de réchauffage H_f

$$H_f = \frac{Q_{\text{totale}}}{\frac{1}{\varepsilon}} \dots\dots\dots \text{(II.40)}$$

$$\frac{1}{\varepsilon} = 0.39$$

$$Q_{\text{totale}} = 4.12 \times 10^6 \text{Btu}$$

$$H_f = 1.07 \times 10^7 \text{Btu}$$

II.6.5.8. Calcul du temps de réchauffage du tamis « t_r »

D'après l'annexe 03

Le Tableau II-4 : les valeurs utilisées pour calculer le temps de réchauffage du tamis

| | |
|---|----------------------|
| Quantité de chaleur apporté par le GN : H_f (BTU) | 1.07 10 ⁷ |
| Déférence de L'enthalpie (ΔH_{(280-12.7) °c} : BTU / Nm³) | 1179,47 |
| Masse volumique du ρ_{GN} (Lb/ Nm³) | 1,8298 |
| Température finale (T_f : °F) | 536 |
| Température initiale (T_i : °F) | 54,86 |

Pour ΔH en KJ / Nm³: $\Delta H = \Delta H(\text{KJ/Kg}) \times \rho_{\text{GN}}$ **(II.41)**

$$\Delta H = 640.66 \text{ kJ / Kg.}$$

$$\rho_{\text{GN}} = 0.83 \text{ Kg/ Nm}^3 = 1,83 \text{Lb/ Nm}^3.$$

$$\Delta H = 534.60 \text{Kj/Nm}^3 = 506.25 \text{Btu/Nm}^3$$

D'après l'équation (II.8) :

$$H_f = 1.03 \cdot 10^7 \text{ BTU}$$

$$\Delta H = 507,42 \text{BTU/ Nm}^3.$$

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

H_f: La chaleur fournie par le four pour le GN exprimée en (BTU / Nm³).

M_{GN}: Le débit du GN sortant du four exprimé en (Nm³/h).

ΔH_(T_e-T_{ads}): La déférence de l'enthalpie du gaz (BTU / Nm³)

$$t_r = 10.6\text{hr}$$

II.6.5.9. Calcul de la chaleur fournie par le four par de H_f / cycle

$$t_r = 10.6 \text{ h.}$$

$$H_f = 1.07 \cdot 10^7 \text{ BTU.}$$

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

D'après l'équation (II.9) :

$$H_{f/\text{cycle}} = 3.06 \times 10^6 \text{Btu/hr}$$

II.6.5.10. Calcul du temps de refroidissement du tamis « t_{ref} »

D'après l'équation (II.10) :

$$Q_{\text{totale}} = 4.12 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

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

$$Q_{\text{tamis}} = 7.13 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_r = 10,6\text{hr.}$$

$$t_{\text{ref}} = 4.47\text{hr}$$

II.6.5.11. Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}

D'après l'équation (II.11) :

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

$$Q_{\text{tamis}} = 7.13 \cdot 10^5 \text{ Btu.}$$

$$t_{\text{ref}} = 4,47\text{hr.}$$

$$Q_{\text{ref}} = 3.9 \times 10^5 \text{Btu/hr}$$

II.7. CALCUL DU BILAN DE MATIÈRE DE LA RÉGÉNÉRATION**II.7.1. Calcul du débit du gaz de refroidissement**

D'après l'équation (II.12) :

$$Q_{\text{ref}} = 3.9 \times 10^5 \text{BTU/hr}$$

$$\Delta H_{(T_s - T_e)} = 506.25 \text{ BTU/Nm}^3.$$

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

$$T_e = 12.7 \text{ }^\circ\text{C} = 54.86 \text{ }^\circ\text{F} = 285.7 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$M_{\text{ref}} = 7.71 \times 10^2 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

II.8. CALCUL DES PERTES DE CHARGES

II.8.1. Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_1$ pour le GN chaud

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

II.8.1.1. Calcul de la masse volumique du GN

II.8.1.2. Calcul du coefficient de compressibilité (Z)

Le facteur de compressibilité est calculé par la formule suivante :

$$Z = 1.046 - (2.034 \times 10^{-9}) \times P + (4.571 \times 10^{-8}) \times P^2 \dots\dots\dots (\text{II.42})$$

Avec **P** est la pression du travail exprimé en Psia .

$$Z = 1.05$$

$$Z = 1.05.$$

$$T = 280 \text{ }^\circ\text{C} = 553.15 \text{ }^\circ\text{K}.$$

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

$$R = 0.082 \text{ L. atm / mole. }^\circ\text{k}.$$

$$\rho_{\text{GN}} = 1.77 \text{ Kg/m}^3$$

II.8.1.3. Calcul de la vitesse superficielle U_1 à travers le lit (Voir l'annexe 02)

$$S = \frac{\pi \times D^2}{4} \dots\dots\dots (\text{II.43})$$

$$S = 5.411 \text{ ft}^2$$

$$\rho_{\text{GN}} = 1.77 \text{ Kg / Nm}^3 = 0.11 \text{ lb. / ft}^3.$$

$$M_g = 2000 \text{ Nm}^3 / \text{hr} = 3.68 \times 10^3 \text{ Lb / hr}$$

$$U_1 = \frac{M_g}{60 \times S \times \rho_{GN}} \dots\dots\dots (\text{II.44})$$

$$U_1 = 102.09 \text{ft/min}$$

II.8.1.4. Calcul de la viscosité du GN chaud μ_1

Le gaz naturel de refroidissement : T= 12.7 °C P= 4.5 kg / cm²

II.8.1.4.1. Calcul de la masse volumique du GN ρ_{GN}

Connaissant la densité relative D_r et la pression de régénération [5], Voir annexes 04 :

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

$$d_r = \frac{M_{GN}}{M_{air}} \dots\dots\dots (\text{II.45})$$

$$d_r = 0.65$$

$$T = 280 \text{ °C.}$$

$$\mu_1 = 0.02 \text{ Cp} = 0.043 \text{ Lb /ft .h}$$

D'après l'équation (II.13).

$$\frac{\Delta P}{L_1} = 0.22 \text{psia/ft}$$

II.8.1.4.2. Calcul de Re

$$D_p = 0.01 \text{ ft.}$$

$$\mu_1 = 0.02 \text{ Cp} = 0.04 \text{ lb. /ft.hr.}$$

$$G = \frac{M_g}{s} \dots\dots\dots (\text{II.46})$$

$$G = 677.745 \text{Lb/ft}^2 \times \text{hr}$$

D'après l'équation (II.14).

$$Re = 158$$

II.8.2. Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_2$ pour le GN froid

II.8.2.1. Calcul du coefficient de compressibilité (Z)

$$Z = f(T_r, P_r) \dots \dots \dots (II.47)$$

$$T_r = T / T_c \dots \dots \dots (II.48)$$

$$P_r = P / P_c \dots \dots \dots (II.49)$$

T_c, P_c : paramètres pseudo critiques.

T_r, P_r : température et pression réduites.

$$T_c = \sum Y_i \times T_{ci} \dots \dots \dots (II.50)$$

$$T_c = 194.3^\circ k$$

$$P_c = \sum Y_i \times P_{ci} \dots \dots \dots (II.51)$$

$$P_c = 45.12 atm$$

$$Z = f(T_r = 1.47; P_r = 0.1)$$

$$Z = 0.91$$

Et selon l'annexe (05 et 06) et d'après l'équation (II.31) :

$$Z = 0.91$$

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

$$T = 12.7^\circ C = 285.85 \text{ }^\circ K.$$

$$P = 4.5 \text{ kg / cm}^2 = 4.44 \text{ ATM.}$$

$$R = 0.082 \text{ l. atm / mole. }^\circ K.$$

$$\rho_{GN} = 3.816 \text{ kg/m}^3$$

II.8.2.2. Calcul de la vitesse superficielle U_2 à travers le lit

D'après l'équation (II.42)

$$S = 5.411 \text{ ft}^2$$

$$\rho_{GN} = 3.8162 \text{Kg} / \text{m}^3 = 0.238 \text{Lb} / \text{ft}^3.$$

$$M_g = M_{\text{ref}} = 710.08 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1.31 \cdot 10^3 \text{ Lb} / \text{hr}$$

D'après l'équation (II.43)

$$U_2 = 18.41 \text{ft}/\text{min}$$

II.8.2.3. Calcul de la viscosité du GN froid μ_2

Connaissant la densité relative D_r et la pression de régénération (Voir annexe 04).

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

D'après l'équation (II.44)

$$d_r = 0.645$$

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

$$\mu_2 = 0.01 \text{ Cp} = 0.03 \text{ Lb} / \text{ft}.\text{hr}.$$

D'après l'équation (II.13).

$$\frac{\Delta P}{L_2} = 1.75 \times 10^{-2} \text{psi}/\text{ft}$$

II.8.2.4. Calcul de R_{e2}

$$D_p = 0.01 \text{ft}.$$

$$\mu_2 = 0.01 \text{ Cp} = 0.03 \text{ Lb} / \text{ft}.$$

D'après l'équation (II.45) :

$$G = 262.91 \text{Lb}/\text{ft}^2 \times \text{hr}$$

D'après l'équation (II.14) :

$Re = 87.64$

Tableau II.5 : Regroupement des résultats

| Les valeurs calculées | Les valeurs de design |
|---|---|
| $M_t = 4652.61 \text{ Kg}$ | $M_t = 4653 \text{ Kg}$ |
| $H_t = 1.8 \text{ m}$ | $H_t = 2.1 \text{ m}$ |
| $H_f = 10680972.48 \text{ Btu/hr} = 269156 \text{ Kcal/hr}$ | $0.15 * 10^6 < H_f < 3.3 * 10^6 \text{ Kcal/hr}$ |
| $t_r = 10.6 \text{ hr}$ | $t_r = 11 \text{ hr}$ |
| $t_{ref} = 4.47 \text{ hr}$ | $t_{ref} = 5 \text{ hr}$ |
| $M_g = 2000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ $M_{ref} = 771.48 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ | $1000 < \text{Débit} < 2500 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ |
| $\Delta P_1 / L = 0.22 \text{ psi /ft}$ $\Delta P_2 / L = 0.017 \text{ psi /ft}$ | $0.01 < \Delta P / L < 0.25 \text{ psi /ft}$ |
| $Re_1 = 157.61$ $Re_2 = 87.64$ | $Re > 100$ |
| $t_{ads} = 36.79 \text{ hr}$ | $t_{ads} = 36 \text{ h}$ |

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 quant chaleur fournie par le four.

Le régime d'écoulement est Laminaire, donc il favorise un bon transfert de masse et une meilleure distribution du gaz à travers le sécheur.

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

Pour couronner nos calculs, il nous a paru préférable d'élaborer un programme personnel à notre niveau en utilisant la théorie présumée afin qui soit disponible pour nous et pour travail ultérieur.

Le programme est basé sur l'Excel est le suivant :

II.9. Étude de la première solution

En vue d'optimiser le temps d'adsorption, on procède au calcul du temps pour 25 ppm [13].

II.9.1. Calcul le débit d'eau

D'après l'équation (II.23) :

D_L : le diamètre du lit. ($D_L=2.1 \text{ m}=6.89\text{ft}$). (Voir annexe 02).

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

ρ_{GPL} : Masse volumique de la charge (Lb/ ft³)

Q : Débit volumique de la charge (ft³/hr).

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

$$q_w = 0.19\text{Lb}/\text{ft}^2 \times \text{hr}$$

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.

II.9.2. Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse

D'après l'équation (II.24) :

q_w : le débit d'eau en Lb/ft².hr.

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

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

$$H_z = 20.5\text{inch} = 1.03\text{ft} = 0.314\text{m}$$

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

II.9.3. Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre

D'après l'équation (II.25) :

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

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

H_t : la hauteur totale du lit ($H_t = 2.1\text{m} = 6.89\text{ft}$).

$$H_S = 4.87\text{ft} = 1.48\text{m}$$

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

II.9.4. Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ad}

D'après l'équation (II.28)

X_s : la capacité d'adsorption à l'équilibre neuf à 25°C, $X_s=22\%$ en poids (voir l'annexes 02).

ρ_{tamis} : Masse volumique du tamis

C: Constante relative aux tamis moléculaire.

$$M_{ads} = 869.43\text{Lb}$$

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 nous oblige d'utiliser un Coefficient de correction $C=0.45$.

II.9.5. Calcul du temps d'adsorption

D'après l'équation (II.29) :

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

ρ_{GPL} : Masse volumique de la charge (Lb/ ft³)

Q: Débit volumique de la charge (ft³ / h).

$$t_{ads} = 162.79\text{hr}$$

II.9.6. Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb d'adsorbant (X)

D'après l'équation (II.27) :

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

$$X = 13.22\text{Lb d'eau}/100\text{Lbd'adsorbant}$$

II.9.7. Détermination de l'efficacité d'adsorption

D'après l'équation (II.30) :

$$\text{EFF} = 92.13$$

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

II.10. Calcul du bilan thermique**II.10.1. Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}**

La quantité d'eau adsorbée $M_{ads} = 869,43$ Lb.

La chaleur de désorption $\Delta H = 1800$ BTU/Lb. (Voir annexe 02).

D'après l'équation (II.2) :

$$Q_{des} = 2.1 \times 10^6 \text{Btu}$$

II.10.2. Calcul des pertes de chaleur Q_{perte}

On estime les pertes par :

D'après l'équation (II.5) :

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

$$Q_{tamis} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$Q_{des} = 2.1 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{perte} = 3.85 \times 10^5 \text{Btu}$$

Q_{des} : la chaleur de désorption

Q_{tamis} : la chaleur de chauffage du tamis

Q_{acier} : la chaleur de chauffage de l'acier

II.10.3. Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale}

D'après l'équation (II.1) :

$$Q_{totale} = 4.23 \times 10^6 \text{Btu}$$

II.10.4. Calcul de la chaleur fournie par le four H_f

D'après l'équation (II.7) :

$$\frac{1}{\epsilon} = 0.39$$

$$Q_{totale} = 4.23 \cdot 10^6 \text{ Btu}$$

$$H_f = 1.10 \times 10^7 \text{Btu/hr}$$

II.10.5. Calcul du temps de réchauffage du tamis « t_r »

D'après l'équation (II.8) :

M_{GN}: La quantité de chaleur du GN sortant du four exprimé en (Nm³/h).

ΔH_(T_e-T_{ads}): La différence de l'enthalpie du gaz de réchauffage (BTU / Nm³) (Voir annexes 6).

$$H_f = 1.10 \cdot 10^7 \text{ Btu / h}$$

$$\Delta H = 507,42 \text{ Btu/Nm}^3.$$

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

$$t_r = 10.81 \text{ hr}$$

II.10.6. Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle H_F/ CYCLE_{_}

$$t_r = 10,81 \text{ hr.}$$

$$H_f = 1.10 \cdot 10^7 \text{ Btu/ hr.}$$

$$t_{ads} = 162,79 \text{ h.}$$

D'après l'équation (II.9) :

$$H_{f/cycle} = 7.28 \times 10^5 \text{Btu/hr}$$

II.10.7. Calcul du temps de refroidissement du tamis « t_{réf} »

D'après l'équation (II.10) :

$$Q_{totale} = 4.23 \cdot 10^6 \text{ Btu}$$

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

$$Q_{tamis} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ Btu.}$$

$$t_r = 1.08 \times 10^6 \text{ hr}$$

$$T_{réf} = 4.85 \text{ hr} = 5 \text{ hr}$$

II.10.8. Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{réf}

D'après l'équation (II.11) :

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

$$Q_{tamis} \quad Q_{tamis} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$T_{ref} \quad T_{réf} = 4,85 \text{ h.}$$

$$Q_{ref} = 3.6 \times 10^5 \text{ Btu/hr}$$

II.11. Calcul du bilan de matière de la régénération

II.11.1. Calcul du débit du gaz de refroidissement

D'après l'équation (II.12) :

M_{ref} : Le débit du gaz de refroidissement (Lb/ h).

Q_{ref} : la chaleur soutirée au système. (Btu/ h).

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

$\Delta H_{(T_S - T_E)}$: La différence de l'enthalpie du gaz de refroidissement (Btu/ Nm³)

$$Q_{ref} = 3.6 \cdot 10^5 \text{ Btu/hr .}$$

$$\Delta H_{(T_S - T_E)} = 507,42 \text{ Btu/ Nm}^3.$$

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

$$T_E = 12.7 \text{ °C} = 54.86 \text{ °F} = 285.7 \text{ °K.}$$

$$M_{ref} = 709.25 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

II.12. Calcul des pertes de charges

II.11.1. Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_1$ pour le GN chaud

II.11.1.1. Calcul de la vitesse superficielle U_1 à travers le lit

D'après l'équation (II.23) :

$$S = 5.41 \text{ ft}^2$$

$$\rho_{GN} = 1.77 \text{ Kg / m}^3 = 0.11 \text{ Lb. / ft}^3.$$

$$M_g = 2000 \text{ Nm}^3 / \text{hr} = 3.68 \cdot 10^3 \text{ Lb / hr .}$$

D'après l'équation (II.43) :

$$U_1 = 103.09 \text{ ft/min}$$

II.11.1.2. Calcul de la viscosité du GN chaud μ_1

Connaissant la densité relative D_r et la pression de régénération [13] :

D'après l'équation (II.44) :

$$d_r = 0.64$$

$$P = 450 \text{ K Pascal.}$$

$$T = 280 \text{ °C.}$$

$$\mu_1 = 0.02 \text{ Cp.}$$

D'après l'équation (II.13) :

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

μ : la viscosité du GN (Cp).

U : la vitesse superficielle (FT / min).

ρ_{GN} : la masse volumique du GN (Lb/ ft³).

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

$$A = 0.0561, B = 0.0000889.$$

$$\Delta P/L_1 = 0.25 \text{ psi/ft}$$

II.11.1.3. Calcul de Re_1

$$D_p = 0.01 \text{ ft.}$$

$$\mu_1 = 0.02 \text{ Cp} = 0.04 \text{ Lb /ft h.}$$

D'après l'équation (II.45) :

$$G = 680.37 \text{ Lb/ft}^2 \times \text{hr}$$

D'après l'équation (II.14).

$$Re_1 = 166.14$$

II.11.2. Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_2$ pour le GN froid**II.11.2.1. Calcul de la vitesse superficielle U_2 à travers le lit**

D'après l'équation (II.23) :

$$S = 5.411 \text{ft}^2$$

$$\rho_{GN} = 3.88 \text{ Kg} / \text{m}^3 = 0.24 \text{ Lb.} / \text{ft}^3.$$

$$M_g = M_{ref} = 709.25 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1.31 \cdot 10^5 \text{ Lb} / \text{hr}.$$

D'après l'équation (II.43)

$$U_2 = 16.64 \text{ft}/\text{mn}$$

II.11.2.2. Calcul de la viscosité du GN froid μ_2

Connaissant la densité relative d_r et la pression de régénération :

D'après l'équation (II.44) :

$$d_r = 0.64$$

$$P = 450 \text{K Pascal}.$$

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

$$\mu_2 = 0.01 C_P = 0.03 \text{ Lb} / \text{FT. H}.$$

D'après l'équation (II.13).

$$\Delta P/L_2 = 0.03 \text{psi}/\text{ft}$$

II.11.2.3. Calcul de Re_2

$$D_p = 0.01 \text{ft}$$

$$\mu_2 = 0.01 C_P = 0.03 \text{ Lb} / \text{ft. h}.$$

D'après l'équation (II.45) :

$$G = 241.28 \text{Lb}/\text{ft}^2 \times \text{hr}$$

D'après l'équation (II.14) :

$$Re_2 = 91.07$$

II.12 Interprétation des résultats

D’après tous les résultats obtenus , on a réalisé le but de notre travail en modifiant le temps d’adsorption du déshydrateur de charge de 36 heures (le temps de design), au temps obtenu après les calculs qui correspond à 162 heures et 47 minutes.

Cette modification doit être suivie d’une petite variation de la durée de régénération de 10 heures et 49 minutes pour le réchauffage , 4 heures et 33 minutes pour le refroidissement .

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 Laminaire qui favorise un bon transfert de masse , ainsi qu’une bonne distribution des gaz à travers le lit .

II.12.1. Exemple pratique

Afin de vérifier pratiquement la fiabilité de cette solution et prouver que la prolongation du temps d'adsorption n'influe pas sur la qualité des produits finis ; on a effectué un relevé de la teneur en eau du GPL sortant du déshydrateur de charge pour un temps d'adsorption prolongé de 50 heures 47 min et 56 sec et une teneur en eau dissoute sans la charge de 25 ppm .

Le tableau (II.6) ci-dessous indique la stabilité de la teneur en eau du GPL sortant du deshydrateur durant les dernière 30 minutes.

Tableau II.6 : Vérification d’adsorption par rapport du temps

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| temps (hr: min) | 50:17 | 50:19 | 50:21 | 50:23 | 50:27 | 50:33 | 50:35 | 50:37 | 50:39 | 50:41 | 50:43 | 50:45 | 50:47 |
| Teneur en eau (ppm) | 0,105 | 0,104 | 0,105 | 0,106 | 0,106 | 0,107 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,109 | 0,109 | 0,109 |

d'après le tableau on constate que la teneur en eau du GPL sortant du sécheur reste constante dans les environs de 0.1 ppm . Cette teneur est très inférieure de la teneur désirée qui est de l'ordre de 5 ppm .

A partir de ces résultats on peut conclure que par la prolongation du temps d'adsorption du sécheur pour des teneurs en eau inférieures à 100 ppm on ne va pas perturber la qualité du GPL sortant du déshydrateur donc il n'y aura aucun risque de formation d'hydrates .

Dans le cycle teste, est indiqué le début et la fin de l'opération d'adsorption comme vérification de la prolongation du temps d'adsorption à 50 heures 47 mn et 56 sec (TableauII.6)

II.13. Etude de la deuxième solution

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

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

II.13.1. Partie calcul

II.13.1.1. Calcul le débit d'eau

D'après l'équation (II.23) :

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

$$q_w = 0.19\text{Lb/ft}^2 \times \text{hr}$$

II.13.1.2. Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse

D'après l'équation (II.24) :

$$H_z = 12.38\text{inch} = 1.03\text{ft} = 0.314\text{m}$$

II.13.1.3. Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ad}

D'après l'équation (II.28) :

$$M_{ads} = 257.65\text{Lb}$$

II.13.1.4. Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre

D'après l'équation (II.25) :

$$H_s = 4.87\text{ft} = 1.48\text{m}$$

II.13.1.5. Calcul de la hauteur non utilisée, H'

$$H' = H_t - H_s \dots\dots\dots (II.52)$$

$$H' = 2.02\text{ft} = 0.616\text{m}$$

II.13.1.6. Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb d'adsorbant (X)

D'après l'équation (II.27) :

$$X = 13.22\text{Lb d'eau}/100\text{Lbd'adsorbant}$$

II.13.1.7. Détermination de l'efficacité d'adsorption

D'après l'équation (II.30)

$$\text{EFF} = 0.92$$

II.14. CALCUL DU BILAN THERMIQUE**II.14.1. Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}**

La quantité d'eau adsorbée $M_{\text{ads}} = 257,65\text{Lb}$.

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

D'après l'équation (II.2) :

$$Q_{\text{des}} = 4.64 \times 10^5 \text{Btu}$$

II.14.2. Calcul des pertes de chaleur Q_{perte}

D'après l'équation (II.5) :

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

$$Q_{\text{tamis}} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ Btu}$$

$$Q_{\text{des}} = 4.64 \cdot 10^5 \text{ Btu}$$

$$Q_{\text{perte}} = 2.21 \times 10^5 \text{ Btu}$$

II.14.3. Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale}

D'après l'équation (II.1) :

$$Q_{\text{totale}} = 2.43 \times 10^6 \text{ Btu}$$

II.14.4. Calcul de la chaleur fournie par le four H_f

D'après l'équation (II.7) :

$$\frac{1}{\varepsilon} = 0.3898.$$

$$Q_{\text{totale}} = 2.43 \cdot 10^6 \text{ Btu.}$$

$$H_f = 6.31 \times 10^6 \text{ Btu}$$

II.14.5. Calcul du temps de réchauffage du tamis « t_r »

D'après l'équation (II.8) :

$$H_f = 6.31 \cdot 10^6 \text{ Btu}$$

$$\Delta H = 507,42 \text{ Btu/ Nm}^3.$$

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

$$t_r = 6.22 \text{ hr}$$

II.14.6. Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle $H_{f/\text{cycle}}$

$$t_r = 6.22 \text{ hr.}$$

$$H_f = 6.31 \cdot 10^6 \text{ Btu/ hr.}$$

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

D'après l'équation (II.9) :

$$H_{f/\text{cycle}} = 1.09 \times 10^6 \text{ Btu}$$

II.14.7. Calcul du temps de refroidissement du tamis « $t_{\text{réf}}$ »

D'après l'équation (II.10) :

$$Q_{\text{totale}} = 2.43 \cdot 10^6 \text{ Btu}$$

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

$$Q_{\text{tamis}} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ Btu.}$$

$$t_r = 6.22\text{H}$$

$$t_{\text{ref}} = 7.90\text{hr}$$

II.14.8. Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}

D'après l'équation (II.11) :

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

$$Q_{\text{tamis}} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_{\text{ref}} = 7.90\text{hr}$$

$$Q_{\text{ref}} = 3.6 \times 10^5 \text{ Btu/h}$$

II.14.9. Calcul du bilan de matière de la régénération**II.14.9.1. Calcul du débit du gaz de refroidissement**

D'après l'équation (II.12) :

$$Q_{\text{ref}} = 3.610^5 \text{ Btu/hr .}$$

$$\Delta H_{(T_S - T_E)} = 507,42 \text{ Btu/ Nm}^3.$$

$$T_S = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 440.6 \text{ }^\circ\text{F} = 500 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$T_E = 12.7 \text{ }^\circ\text{C} = 54.86 \text{ }^\circ\text{F} = 285.7 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$M_{\text{ref}} = 709.25 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

II.15. Interprétation des résultats

Selon les résultats obtenus , il est clairement apparent que la durée de régénération est modifiée , une diminution du temps de chauffage jusqu'à 6 heures 13 minutes et une durée de 7 heures 54 minutes pour le refroidissement sans perturber la durée du cycle d 'adsorption de 36 heures .

Cette modification présente une économie moins importante d'énergie fournie par le four par cycle de fonctionnement puisque la même quantité de gaz naturel que pour le cycle d'adsorption de 36 h dépensée pour un cycle d'adsorption plus long .

Au cours de l'étape d'adsorption , les solide sont chargés d'humidité ceci se traduit à l'équilibre par un état de saturation , le solide saturé n'adsorbe plus une régénération doit succéder au chargement au cours de cette dernière l'humidité est éliminer par un chauffage ; et dans notre cas où le lit n'est pas totalement saturé le chauffage de la partie sèche du lit devient inutile et peut provoquer la dégradation du tamis et par conséquent diminution de son efficacité ; ce résultat est vérifiée quel que soit la teneur d'eau dans la charge .

Le tableau suivant montre les différentes hauteurs du lit non utilisés lors de la déshydratation pour des teneurs d'eau différentes $t_{ads} = 36hr$.

Tableau II.6 : Hauteurs du lit non utilisés

| | | | | | |
|--------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Yin ppm | 100,00 | 80,00 | 60,00 | 40,00 | 25,00 |
| H z ft | 2,14 | 1,90 | 1,63 | 1,32 | 1,03 |
| H tamis ft | 6,89 | 6,89 | 6,89 | 6,89 | 6,89 |
| Hs ft | 4,75 | 4,48 | 4,77 | 5,14 | 5,49 |
| H' non utilisé ft | 0.00 | 0,36 | 0,43 | 0,48 | 0,53 |

II.16. INTERPRÉTATION ET CHOIX DE LA SOLUTION OPTIMALE

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 :

1. Une diminution de gaz naturel consommé lors de la régénération de la séquence de refroidissement.
2. 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.

3. Une augmentation de la durée de vie du tamis moléculaire.
4. Une perte moins importante lors de la régénération du produit GPL piégé dans le tamis moléculaire.
5. Augmentation de l'efficacité du tamis à cause de la diminution de la destruction des cristaux.

En plus pour la mise en œuvre de cette idée, aucun investissement n'est nécessaire.

II.17. COMPARAISON ENTRE LES DEUX SOLUTIONS OPTIMALES

II.17.1. Première solution

On fixe le temps de régénération puis on fait varier le temps d'adsorption (Tableau II.7)

Tableau II.7 : temps de régénération fixé

| | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Teneur en eau en ppm | 100 | 80 | 60 | 40 | 25 |
| Temps d'adsorption | 36,98 | 47,22 | 64,45 | 99,31 | 162,79 |
| Temps de réchauffage | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Nombre d'heures par ans | 8760 | 8760 | 8760 | 8760 | 8760 |
| Débit de réchauffage | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Nombre de cycle pendant un an | 5,53 | 4,47 | 3,38 | 2,27 | 1,13 |
| Nombre de régénération par un an | 243 | 185 | 135 | 87 | 53 |
| Quantité de GN pour le réchauffage pendant une régénération | 22000 | 22000 | 22000 | 22000 | 22000 |
| Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an | 5346000 | 4070000 | 2970000 | 1914000 | 1166000 |
| Gain en GN par ans et par train en Nm³ | | 1276000 | 2376000 | 3432000 | 4180000 |

II.17.2. Deuxième solution

On fixe le temps de d'adsorption puis on varie le temps régénération (Tableau II.8)

Tableau II.8 : temps d'adsorption fixé

| | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Teneur en eau en ppm | 100 | 80 | 60 | 40 | 25 |
| Temps d'adsorption | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Temps de réchauffage | 11 | 8,86 | 7,73 | 6,64 | 6.22 |
| Nombre d'heures par ans | 8760 | 8760 | 8760 | 8760 | 8760 |
| Débit de réchauffage | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Nombre de régénération par un an | 243 | 243 | 243 | 243 | 243 |
| Quantité de GN pour le réchauffage pendant une régénération | 22000 | 17 717 | 15 467 | 13 278 | 12340 |
| Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an | 5346000 | 4305960 | 3756780 | 3227040 | 2998620 |
| Gain en quantité de GN par ans et par train en Nm³ | | 1040040 | 1589220 | 2118960 | 2347380 |

II.17.3. Représentation graphique des avantages de solution optimale

II.17.3.1. Prolongation du temps d'adsorption

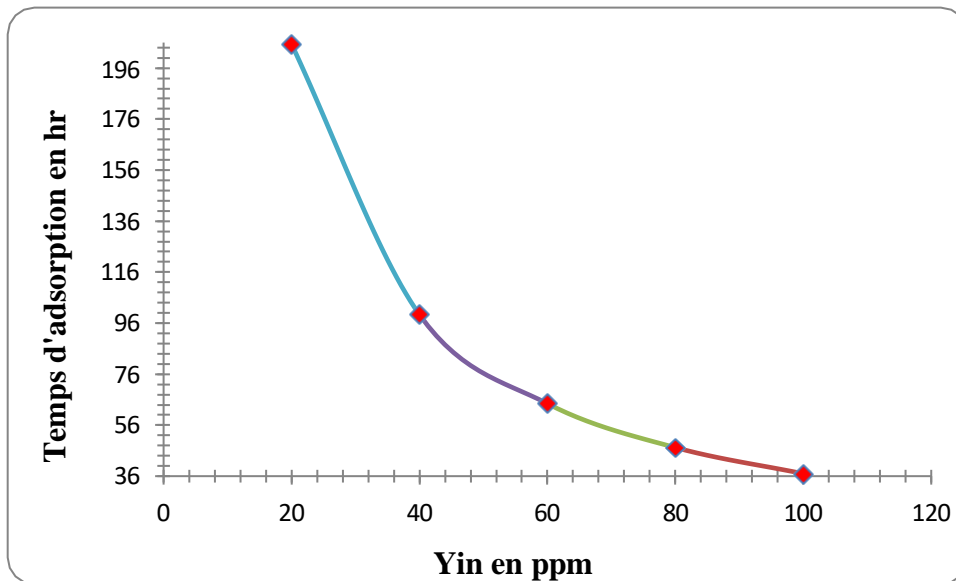


Figure II.2: le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau.

La figure II.2 montre que le temps d'adsorption augmente avec la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL .

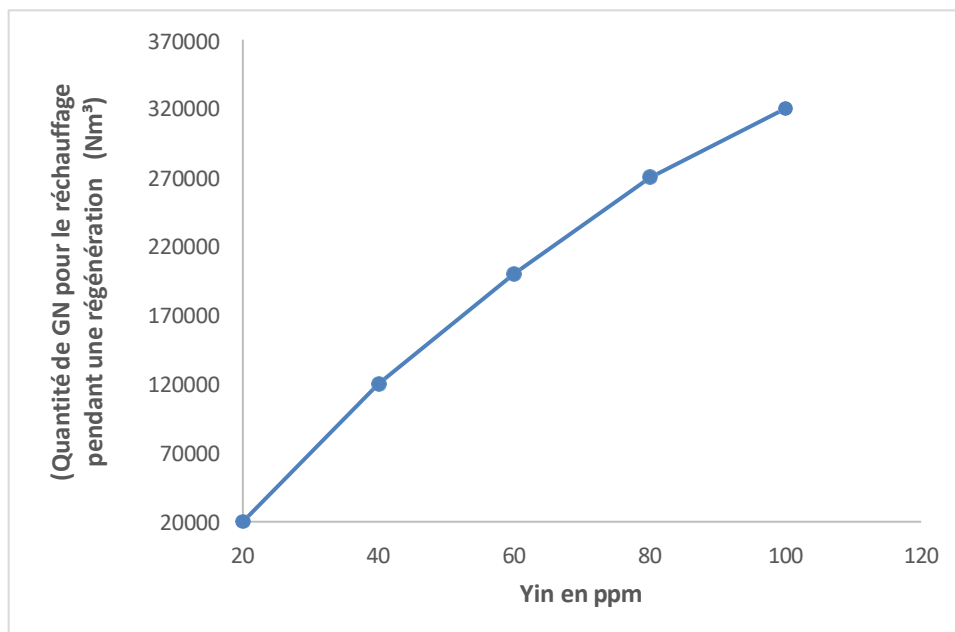


Figure II.3 : Quantité de GN utilisée pendant une régénération en fonction de la teneur en eau pour la première solution .

On remarque que la quantité du GN utilisée pour les 100 ppm diminue avec la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL (figure II.3).

II.18. MODIFICATION DU TEMPS DE REGENERATION

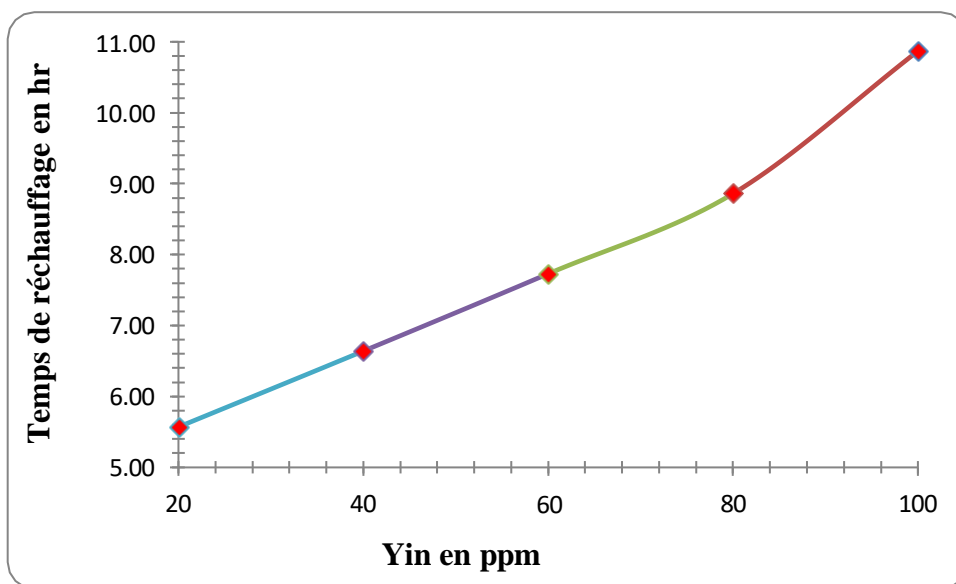


Figure II.4: le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau .

Le temps de régénération diminue proportionnellement avec la teneur en eau dans la charge GPL (figure II.4).

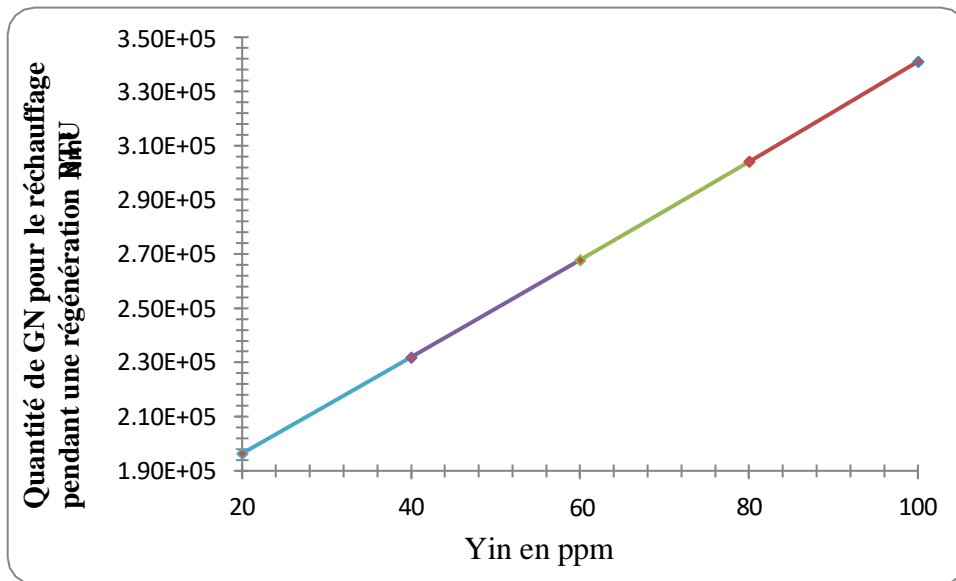


Figure II.5: Quantité de GN utilisée pendant une régénération en fonction de la teneur en eau pour la deuxième solution.

On déduit que la quantité du GN utilisée diminue proportionnellement en fonction de la teneur en eau dans le GPL.

II.19 CALCUL ECONOMIQUE

Pour mettre en valeur notre étude, nous avons trouvé intéressant de la finaliser par un calcul économique traduisant les gains qui doit bénéficier le complexe GP1 /Z par la mise en exploitation de nos résultats.

II.19.1 Étude Économique Des Résultats De La Solution Optimale

II.19.1.1 gain en gaz naturel

Pour un cycle d'adsorption de 162 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 162 h) est détaillé ci-dessous

$$\frac{\text{le nombre de cycle}}{\text{mois}} = \frac{\text{nombre d'heures par mois}}{\text{durée d'un cycle}} = \frac{720}{162} = \mathbf{5 \text{ cycles}} \dots\dots\dots \text{(II.53)}$$

- (10.6 heures de réchauffage et 4.47 heures de refroidissement).
- Le débit horaire de GN durant :

Le chauffage : 2000 Nm³ / h

Le refroidissement : 760 Nm³ / h.

– Le nombre de cycle actuel = $\frac{720}{(36+19)} = \frac{720}{55} = 13.09$ cycles.....(II.54)

– Le nombre de cycle gagnés par mois pour un train :

= (le nombre de cycle actuel – le nombre de cycle plus long) = 13.09 – 5 = 8.09 cycles..... (II.55)

– Le gain en GN chaud pour un train par mois = 8.09 × 10.6 × 2000 = 171508Nm³/mois

Et pour 9 trains = 171508 × 9 = 1543572Nm³/mois

– Le gain en GN froid pour un train par mois = 8.09 × 4.47 × 760 = 27483.348Nm³/mois

– Et pour 9 trains = 27483.348 × 9 = 247350.132Nm³

1.069Nm³ = 1contra m³

– Prix unitaire du GN : 10³ C/m³ = 1341.39DA

– Le gain en GN pour 9 trains par mois (sur la base d'un prix unitaire de 1 Nm³. Soit 1.255 DA pour Nm³ / h)

Le GN de chauffage : 1.255 × 1543572 = 1.9 × 10⁶DA

Le GN de refroidissement : 1.255 × 247350.132 = 0.310 × 10⁶DA

La moitié de la quantité du GN de régénération est récupérée au niveau du four. Ainsi le gain réel mensuel pour un train sera :

$\frac{1}{2} \times (1.9 + 0.310) \times 10^6 = 1.11 \times 10^6$ DA..... (II.56)

– Le gain réel annuel pour 9 trains par an

– G_r = 12 × 1.11 × 10⁶

– G_r = 13.32 × 10⁶DA

II.19.2 Gain Sur La Vie Du Tamis Moléculaire

- La quantité totale de tamis moléculaire d'un déshydrateur est de 4 653 kg
- Le prix du tamis est de 355.08DA/Kg
- Un déshydrateur revient 1 652168 DA(4653×355.08)
- La durée de vie actuelle du tamis moléculaire est de 3 ans
- Le changement des tamis de la phase I 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 changement des tamis de la phase III se fait tous les 9 ans du fait qu'il y a 3 déshydrateurs par train.
- Le coût de L'opération de changement du tamis moléculaire d'un déshydrateur chaque année revient :
- Pour la phase I 183 574,2 DA ($1652168/9$)
- Pour la phase II 275 361,3 DA($1652168/6$)
- Pour la phase III 1 83 574,2 DA ($1652168/9$)
- Avec un cycle d'adsorption de 181 heures (162 heures adsorption et 19 heures de régénération) pour un déshydrateur :
- La durée de vie du sécheur dans la phase I et la phase III devient :
- $181 \times 9/55 = 29.9\text{ans} = 30\text{ans}$
- Le tamis moléculaire de la phase I avec le nouveau cycle reviendrait à 55072,26 DA ($1652168/30$) soit un gain annuel de 128501,94 DA ($183574.2 - 55072.26$)
- La durée de vie du sécheur dans la phase II devient : $183 \times 6/55 = 19.9\text{ans} = 20\text{ans}$

- Le tamis moléculaire de la phase II avec le nouveau cycle reviendrait à 82608,4 DA ($1652168/20$) . Soit un gain annuel de 192752,9 DA ($275361.3 - 82608.4$).
- Le tamis moléculaire de la phase III avec le nouveau cycle reviendrait à 55072,26 DA ($1652168/30$) ($1\ 652\ 168 /30$) soit un gain annuel de 128501,94 DA ($183574.2 - 55072.26$)

Un gain annuel total pour le complexe de 3469552.34 DA

- $[(128501.94 \times 12) + (192752.9 \times 4) + (128501.94 \times 9)]$

II.19.3 Conclusion Des Résultats

Tableau II.9 : Le Gain Annuel En GN et en vie des tamis pour le cycle calculé.

| | Cycle calculé |
|--|----------------------|
| Gain annuel en GN pour 9 trains en DA | 2 508 0000 |
| Gain annuel en vie des tamis pour le complexe en DA | 3 469 552,34 |

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail s'inscrit dans un contexte énergétique national où chaque optimisation des ressources revêt une importance capitale. En effet, les sources d'énergie occupant une place prépondérante dans notre économie, toute amélioration des procédés industriels se traduit directement par des gains économiques substantiels.

L'étude menée au sein du complexe GP1/Z s'est focalisée sur la validation et l'optimisation du processus de déshydratation, visant à réduire la teneur en eau de 100 ppm à 1 ppm. Notre approche méthodologique a permis d'identifier des solutions concrètes pour améliorer l'efficacité énergétique du système.

Les principaux résultats obtenus démontrent qu'une augmentation du temps d'adsorption génère des bénéfices multidimensionnels :

Optimisation énergétique : Un cycle d'adsorption plus long permet d'économiser $4,02 \cdot 10^7$ Nm³ de gaz naturel annuellement, représentant une valeur financière de $25,08 \cdot 10^6$ DA.

Prolongation de la durée de vie des équipements : Les tamis moléculaires voient leur durée de vie augmentée (économie annuelle de $3,47 \cdot 10^6$ DA) grâce à une exposition réduite aux hautes températures de régénération.

Le matériel en général subit moins de contraintes mécaniques et thermiques.

La robinetterie bénéficie d'un nombre réduit de cycles d'ouverture/fermeture.

Amélioration globale de la performance : La réduction des cycles de régénération diminue les sollicitations du système tout en maintenant la qualité du traitement.

Ces améliorations substantielles démontrent l'importance d'une approche systémique dans l'optimisation des procédés industriels. Les gains énergétiques et économiques réalisés, couplés à l'allongement de la durée de vie des équipements,

Conclusion générale

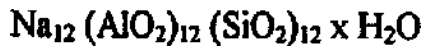
confirment le bien-fondé de cette étude et son application à d'autres installations similaires.

Cette recherche ouvre ainsi des perspectives intéressantes pour une gestion plus efficiente des ressources énergétiques dans le secteur industriel national, contribuant à renforcer la compétitivité de nos installations tout en respectant les impératifs de durabilité.

Annexe 02 :

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 ³ |
| Densité "tasse" | 624 à 657 kg/m ³ |
| Diamètre particule | 3,2 mm |
| Résistance à l'écrasement | 6,8 à 7,7 kg |
| Chaleur d'adsorption (max.) | 1.000 kcal/kg H ₂ 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.

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. CPT | Composant | A | B | C x 10 ³ | D x 10 ⁶ | E x 10 ⁹ | F x 10 ¹² | G | Intervalle °C |
|--------------------------|------------------------|------------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|
| <i>Non-Hydrocarbonés</i> | | | | | | | | | |
| 1 | Oxygène | -2,283574 | 0,952440 | -0,281140 | 0,655223 | -0,452316 | 1,087744 | 2,080310 | -175 to 1200 |
| 2 | Hydrogène | 28,671997 | 13,396156 | 2,960131 | -3,980744 | 2,661667 | -6,099863 | -11,801371 | -175 to 1200 |
| 3 | Eau | -5,729915 | 1,915007 | -0,395741 | 0,876232 | -0,495086 | 1,038613 | 0,702815 | -175 to 1200 |
| 4 | Sulfure d'hydrogène | -1,437049 | 0,998865 | -0,184315 | 0,557087 | -0,317734 | 0,636644 | 1,394812 | -175 to 1200 |
| 5 | Azote | -2,172507 | 1,068490 | -0,134096 | 0,215569 | -0,078632 | 0,069850 | 1,805409 | -175 to 1200 |
| 6 | Ammoniac | -2,202606 | 2,010317 | -0,650061 | 2,373264 | -1,597595 | 3,761739 | 0,990447 | -175 to 1200 |
| 7 | Carbone | 9,572700 | -0,199901 | 1,535456 | 0,267516 | -0,811532 | 2,726889 | 1,687611 | -175 to 1200 |
| 8 | Monoxyde de carbone | -2,269176 | 1,074015 | -0,172664 | 0,302237 | -0,137533 | 0,200365 | 2,018445 | -175 to 1200 |
| 9 | Dioxyde de carbone | 11,113744 | 0,479107 | 0,762159 | -0,359392 | 0,084744 | -0,057752 | 2,719180 | -175 to 1200 |
| 10 | Dioxyde de soufre | 3,243188 | 0,461650 | 0,248915 | 0,120900 | -0,188780 | 0,568232 | 2,086924 | -175 to 1200 |
| <i>Paraffines</i> | | | | | | | | | |
| 11 | Méthane | -16,228549 | 2,393594 | -2,218007 | 5,740220 | -3,727905 | 8,549685 | -0,339779 | -175 to 1200 |
| 12 | Ethane | -0,049334 | 1,108992 | -0,188512 | 3,965580 | -3,140209 | 8,008187 | 1,995889 | -175 to 1200 |
| 13 | Propane | -1,717565 | 0,722648 | 0,708716 | 2,923895 | -2,615071 | 7,000545 | 2,289659 | -175 to 1200 |
| 14 | n-Butane | 17,283134 | 0,412696 | 2,028601 | 0,702953 | -1,025871 | 2,883394 | 2,714861 | -75 to 1200 |
| 15 | 2-Méthylpropane | 26,744208 | 0,195448 | 2,523143 | 0,195651 | -0,772615 | 2,386087 | 3,466595 | -75 to 1200 |
| 16 | n-Pentane | 63,201677 | -0,011701 | 3,316498 | -1,170510 | 0,199648 | -0,086652 | 4,075275 | -20 to 1200 |
| 17 | 2-Méthylbutane | 64,252075 | -0,131900 | 3,541156 | -1,333225 | 0,251463 | -0,129589 | 4,572976 | -20 to 1200 |
| 18 | 2,2-Diméthylpropane | 27,380416 | 0,018305 | 3,063221 | -0,375030 | -0,530964 | 2,059134 | 3,388342 | -75 to 1200 |
| 19 | n-Hexane | -17,191071 | 0,959226 | -0,614725 | 6,142101 | -6,160952 | 20,868190 | -0,207040 | -75 to 700 |
| 20 | 2-Méthylpentane | 33,798408 | 0,173685 | 2,348998 | 0,844100 | -1,559115 | 5,534684 | 2,968423 | -75 to 700 |
| 21 | 3-Méthylpentane | 17,964768 | 0,397799 | 1,209870 | 3,254556 | -3,942661 | 14,384148 | 2,149541 | -75 to 700 |
| 22 | 2,2-Diméthylbutane | 92,706801 | -0,500323 | 4,525783 | -2,415290 | 0,713199 | -0,591097 | 5,617113 | -20 to 700 |
| 23 | n-Heptane | -0,153725 | 0,754499 | 0,261728 | 4,366358 | -4,484510 | 14,842099 | 0,380048 | -75 to 700 |
| 24 | 2-Méthylhexane | 17,893709 | 0,404849 | 1,334653 | 2,877698 | -3,511818 | 12,540055 | 1,823456 | -75 to 700 |
| 25 | 3-Méthylhexane | 36,807299 | 0,167431 | 2,262250 | 1,067097 | -1,781538 | 6,169491 | 2,864993 | -75 to 700 |
| 26 | 2,4-Diméthylpentane | 11,508769 | 0,093303 | 2,598254 | 0,630349 | 1,428307 | 4,569218 | 2,847131 | -20 to 700 |
| 27 | n-Octane | 2,604702 | 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 | 1,828883 | 1,744174 | -2,311344 | 7,752627 | 2,038844 | -75 to 700 |
| 30 | 2,2,4-Triméthylpentane | 26,118096 | 0,039675 | 2,742294 | 0,328610 | -1,206014 | 4,586420 | 2,846608 | -75 to 700 |
| 31 | n-Nonane | 4,000278 | 0,707805 | 0,438048 | 3,969342 | -4,043158 | 12,876028 | 0,257265 | -75 to 700 |
| 32 | n-Décane | -6,962020 | 0,851375 | -0,263041 | 5,521816 | -5,631733 | 18,885443 | -0,412446 | -75 to 700 |
| 33 | n-Undécane | 65,290564 | -0,099827 | 3,472495 | -1,354336 | 0,264721 | -0,145574 | 3,407959 | -20 to 1200 |
| 34 | m-Dodécane | 60,967391 | -0,077548 | 3,420649 | -1,308559 | 0,247576 | -0,130380 | 3,227042 | -20 to 1200 |
| 35 | n-Tridécane | 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 | -1,367430 | 0,270024 | -0,150334 | 3,038272 | -20 to 1200 |
| 41 | n-Nonadécane | 59,195816 | -0,092752 | 3,451465 | -1,354690 | 0,265281 | -0,146249 | 2,979932 | -20 to 1200 |
| 42 | n-Eicosane | 59,163624 | -0,095147 | 3,456592 | -1,360776 | 0,267410 | -0,147933 | 2,963523 | -20 to 1200 |

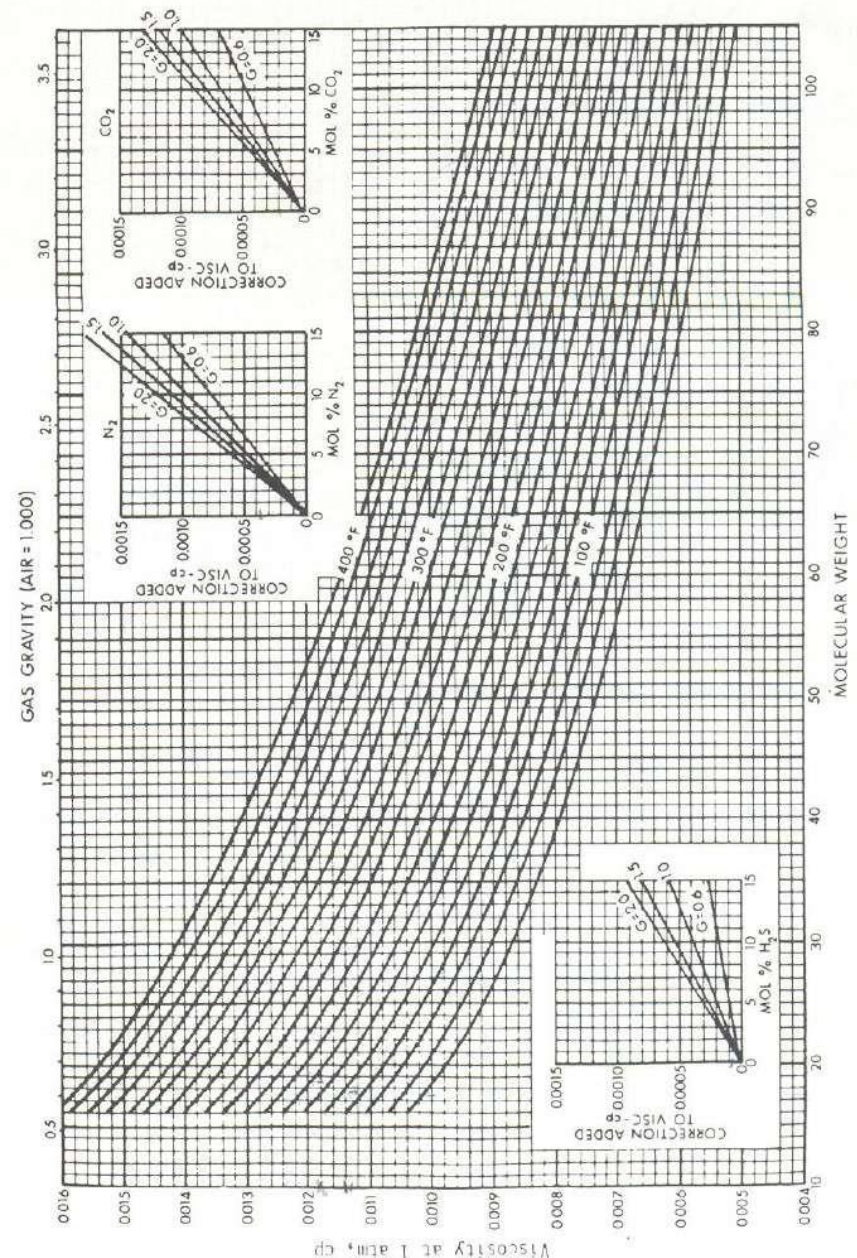
H = 0 kJ/kg pour le gaz parfait à 0 K.

S = 1 kJ/kg K pour le gaz parfait à 0 K et 1 kPa

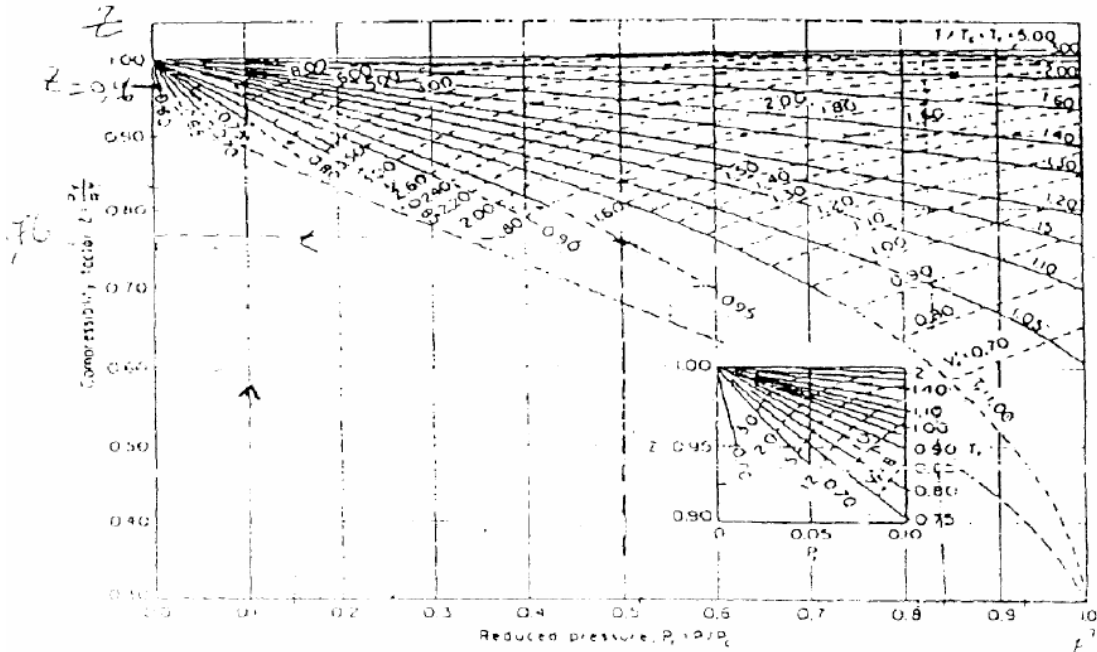
Les unités sont le kJ/kg pour l'enthalpie, le kJ/kg K pour le pouvoir calorifique et l'entropie.

Annexe 04 :

La viscosité μ_g du gaz à la pression et température d'intérêt.



Annexe 05 :



12* Generalized compressibility chart

$$\frac{pv}{RT} = \frac{Z}{T_r}$$

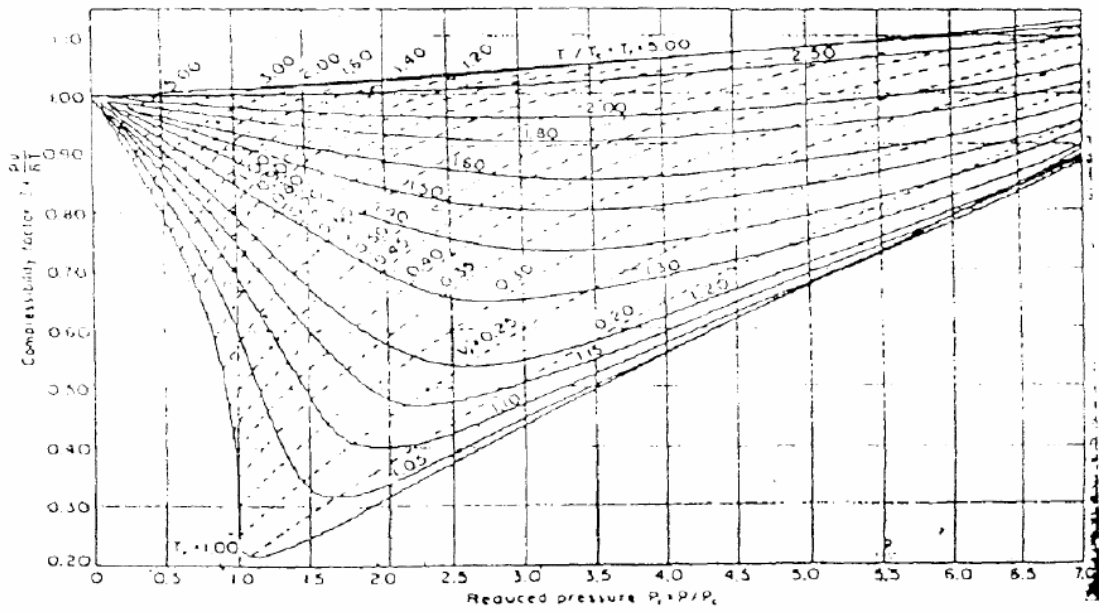


Figure VI- Détermination du coefficient de compressibilité Z.

Constantes critiques de pression et de température

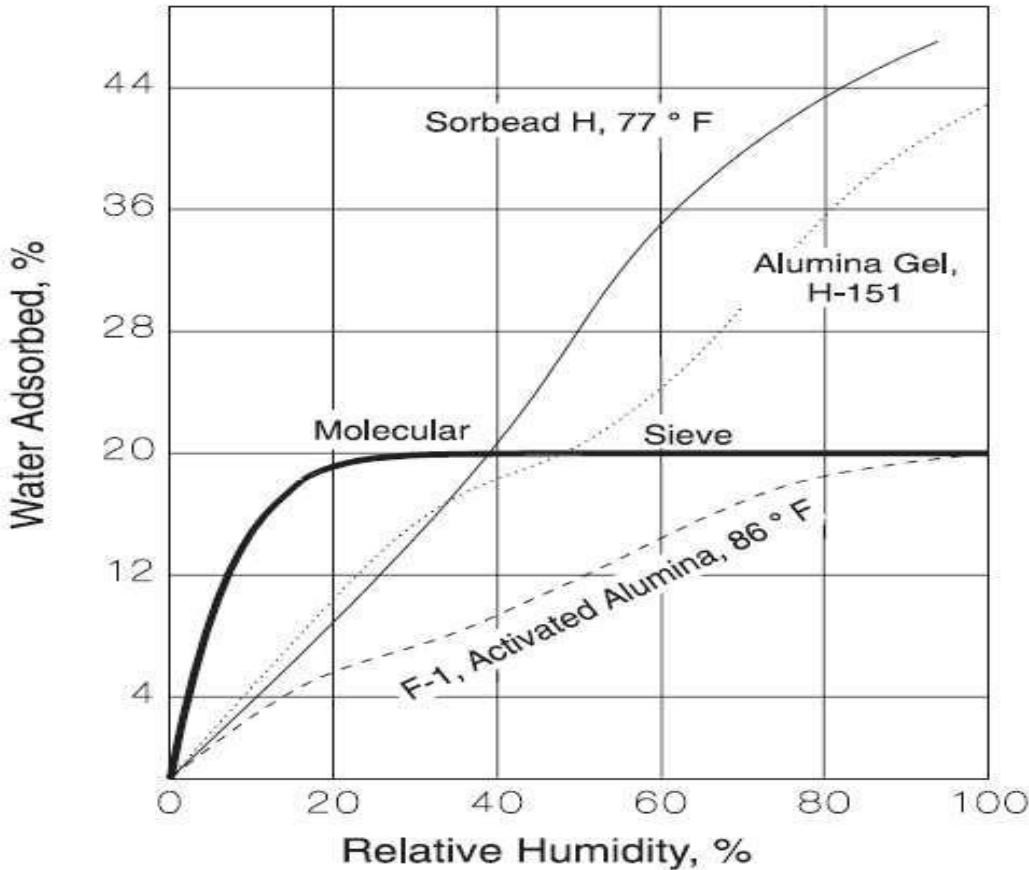
NOTE: Numbers in this table do not have accuracies greater than 1 part in 1000; in some cases extra digits have been added to calculated values to achieve internal consistency or to permit recalculation of experimental values.

PHYSICAL CONSTANTS

*See the Table of Notes and References.

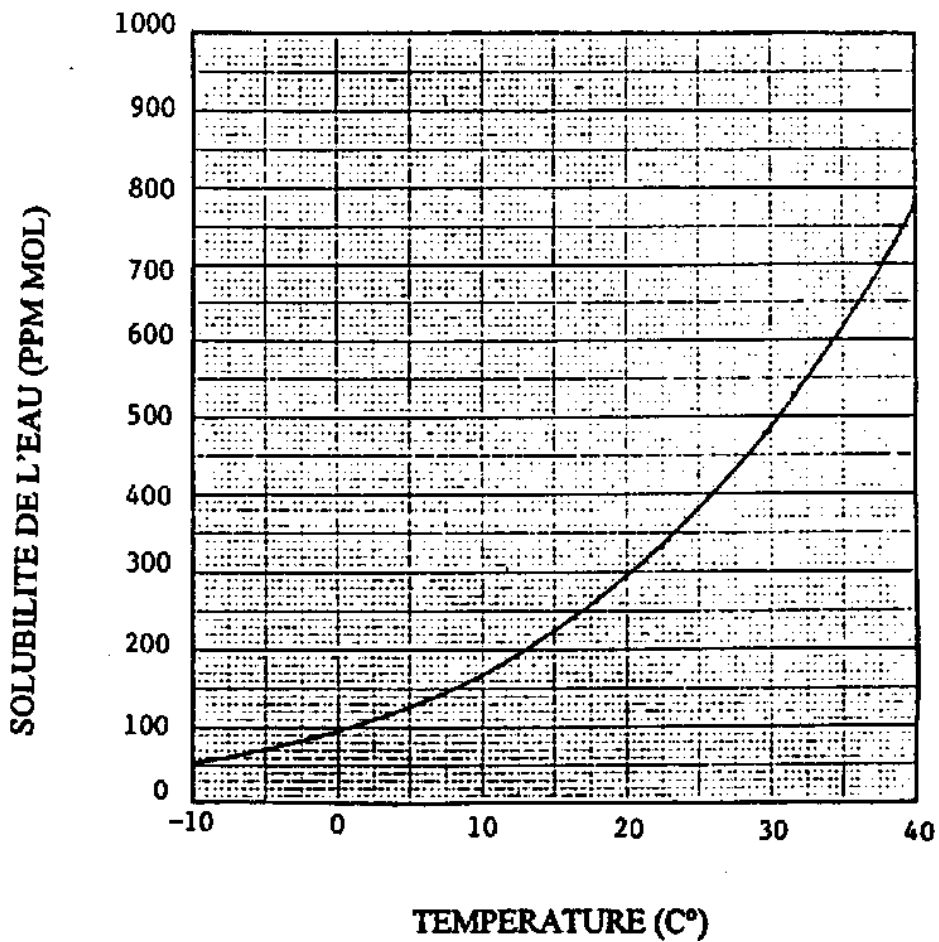
| Number | See Note No. → Compound | Formula | A. Molar mass (molecular weight) | B. Boiling point, °F 14.696 psia | Vapor pressure, psia 100 °F | C. Freezing point, °F 14.696 psia | D. Refractive index, n_D 60 °F | Critical constants | | | Number |
|--------|----------------------------|---------------------------------|--|--|-----------------------------------|---|--|--------------------|-----------------|-----------------------------|--------|
| | | | | | | | | Pressure, psia | Temperature, °F | Volume, ft ³ /lb | |
| | | | | | | | | | | | |
| 1 | Methane | CH ₄ | 16.043 | -258.72 | (5000)* | -296.41* | 1.00041* | 667.0 | -116.66 | 0.0988 | 1 |
| 2 | Ethane | C ₂ H ₆ | 30.070 | -127.46 | (800)* | -297.02* | 1.20971* | 707.8 | 90.07 | 0.0783 | 2 |
| 3 | Propane | C ₃ H ₈ | 44.097 | -43.73 | 188.68 | -305.72* | 1.29480* | 615.0 | 205.92 | 0.0727 | 3 |
| 4 | Isobutane | C ₄ H ₁₀ | 58.123 | 10.78 | 72.598 | -255.26 | 1.3245* | 527.9 | 274.41 | 0.0714 | 4 |
| 5 | n-Butane | C ₄ H ₁₀ | 58.123 | 31.08 | 51.719 | -217.03 | 1.33588* | 548.8 | 305.51 | 0.0703 | 5 |
| 6 | Isopentane | C ₅ H ₁₂ | 72.150 | 82.09 | 20.450 | -255.80 | 1.34771 | 490.4 | 368.96 | 0.0684 | 6 |
| 7 | n-Pentane | C ₅ H ₁₂ | 72.150 | 96.89 | 15.580 | -201.48 | 1.35165 | 488.1 | 385.7 | 0.0695 | 7 |
| 8 | Neopentane | C ₅ H ₁₂ | 72.150 | 49.10 | 36.72 | 2.16 | 1.342* | 464.0 | 321.01 | 0.0673 | 8 |
| 9 | n-Hexane | C ₆ H ₁₄ | 86.177 | 155.70 | 4.9614 | -139.56 | 1.37708 | 439.5 | 451.8 | 0.0688 | 9 |
| 10 | 2-Methylpentane | C ₆ H ₁₄ | 86.177 | 140.44 | 6.769 | -244.60 | 1.36571 | 436.6 | 435.76 | 0.0682 | 10 |
| 11 | 3-Methylpentane | C ₆ H ₁₄ | 86.177 | 145.86 | 6.103 | -261.20 | 1.37090 | 452.5 | 448.2 | 0.0682 | 11 |
| 12 | Neohexane | C ₆ H ₁₄ | 86.177 | 121.50 | 9.859 | -147.68 | 1.36283 | 446.7 | 419.92 | 0.0667 | 12 |
| 13 | 2,3-Dimethylbutane | C ₆ H ₁₄ | 86.177 | 136.33 | 7.406 | -199.35 | 1.36938 | 454.0 | 440.08 | 0.0665 | 13 |
| 14 | n-Heptane | C ₇ H ₁₆ | 100.204 | 209.07 | 1.6211 | -130.99 | 1.38234 | 397.4 | 510.9 | 0.0682 | 14 |
| 15 | 2-Methylhexane | C ₇ H ₁₆ | 100.204 | 194.05 | 2.273 | -180.87 | 1.37940 | 396.0 | 494.44 | 0.0673 | 15 |
| 16 | 3-Methylhexane | C ₇ H ₁₆ | 100.204 | 197.33 | 2.130 | — | 1.38326 | 407.6 | 503.62 | 0.0646 | 16 |
| 17 | 3-Ethylpentane | C ₇ H ₁₆ | 100.204 | 200.26 | 2.012 | -181.44 | 1.38800 | 419.2 | 513.16 | 0.0665 | 17 |
| 18 | 2,2-Dimethylpentane | C ₇ H ₁₆ | 100.204 | 174.50 | 3.494 | -190.80 | 1.37667 | 401.8 | 476.98 | 0.0665 | 18 |
| 19 | 2,4-Dimethylpentane | C ₇ H ₁₆ | 100.204 | 176.85 | 3.294 | -182.59 | 1.37591 | 397.4 | 475.72 | 0.0667 | 19 |
| 20 | 3,3-Dimethylpentane | C ₇ H ₁₆ | 100.204 | 186.87 | 2.775 | -209.99 | 1.38564 | 427.9 | 505.60 | 0.0662 | 20 |
| 21 | Triptane | C ₇ H ₁₆ | 100.204 | 177.54 | 3.376 | -12.21 | 1.38411 | 427.9 | 496.24 | 0.0636 | 21 |
| 22 | n-Octane | C ₈ H ₁₈ | 114.231 | 258.17 | 0.5374 | -70.17 | 1.39248 | 361.1 | 563.5 | 0.0673 | 22 |
| 23 | Diisobutyl | C ₈ H ₁₈ | 114.231 | 228.34 | 1.102 | -132.09 | 1.38735 | 361.1 | 530.26 | 0.0676 | 23 |
| 24 | Isooctane | C ₈ H ₁₈ | 114.231 | 210.58 | 1.709 | -161.23 | 1.38624 | 372.7 | 519.28 | 0.0657 | 24 |
| 25 | n-Nonane | C ₉ H ₂₀ | 128.258 | 303.40 | 0.1716 | -64.26 | 1.40054 | 330.7 | 610.8 | 0.0693 | 25 |
| 26 | n-Decane | C ₁₀ H ₂₂ | 142.285 | 345.40 | 0.06091 | -21.33 | 1.40720 | 304.6 | 652.2 | 0.0702 | 26 |
| 27 | Cyclopentane | C ₅ H ₁₀ | 70.134 | 120.60 | 9.917 | -136.89 | 1.40050 | 653.8 | 461.1 | 0.0594 | 27 |
| 28 | Methylcyclopentane | C ₆ H ₁₂ | 84.161 | 161.29 | 4.491 | -224.38 | 1.40400 | 548.8 | 499.28 | 0.0607 | 28 |
| 29 | Cyclohexane | C ₆ H ₁₂ | 84.161 | 177.40 | 3.287 | 43.79 | 1.42053 | 590.7 | 536.6 | 0.0586 | 29 |
| 30 | Methylcyclohexane | C ₇ H ₁₄ | 98.188 | 213.69 | 1.609 | -195.87 | 1.41778 | 503.4 | 570.20 | 0.0600 | 30 |
| 31 | Ethene(Ethylene) | C ₂ H ₄ | 28.054 | -154.71 | (1400)* | -272.48* | (1.228)* | 731.0 | 48.54 | 0.0746 | 31 |
| 32 | Propene(Propylene) | C ₃ H ₆ | 42.081 | -53.83 | 232.8 | -301.45* | 1.3006* | 676.6 | 188.31 | 0.0717 | 32 |
| 33 | 1-Butene(Butylene) | C ₄ H ₈ | 56.108 | 20.79 | 62.55 | -301.63* | 1.3386* | 586.4 | 296.18 | 0.0683 | 33 |
| 34 | cis-2-Butene | C ₄ H ₈ | 56.108 | 38.69 | 45.97 | -218.01 | 1.3556* | 615.4 | 324.31 | 0.0667 | 34 |
| 35 | trans-2-Butene | C ₄ H ₈ | 56.108 | 33.58 | 49.88 | -157.97 | 1.3487* | 574.9 | 311.80 | 0.0679 | 35 |
| 36 | Isobutene | C ₄ H ₈ | 56.108 | 19.57 | 64.95 | -220.60 | 1.3473* | 580.2 | 292.49 | 0.0681 | 36 |
| 37 | 1-Pentene | C ₅ H ₁₀ | 70.134 | 85.92 | 19.12 | -265.37 | 1.36487 | 509.5 | 376.86 | 0.0674 | 37 |
| 38 | 1,2-Butadiene | C ₄ H ₆ | 54.092 | 51.52 | 36.53 | -213.14 | — | (656.)* | (354.)* | (0.070)* | 38 |
| 39 | 1,3-Butadiene | C ₄ H ₆ | 54.092 | 24.06 | 59.46 | -164.00 | 1.3975* | 620.3 | 306. | 0.0653 | 39 |
| 40 | Isoprene | C ₅ H ₈ | 68.119 | 93.29 | 16.68 | -230.71 | 1.41472 | (582.)* | (403.)* | (0.066)* | 40 |
| 41 | Acetylene | C ₂ H ₂ | 26.038 | -119.21* | — | -113.4* | — | 890.4 | 95.29 | 0.0693 | 41 |
| 42 | Benzene | C ₆ H ₆ | 78.114 | 176.13 | 3.225 | 41.96 | 1.49436 | 710.4 | 552.15 | 0.0531 | 42 |
| 43 | Toluene | C ₇ H ₈ | 92.141 | 231.08 | 1.033 | -138.96 | 1.49102 | 595.5 | 605.50 | 0.0549 | 43 |
| 44 | Ethylbenzene | C ₈ H ₁₀ | 106.167 | 277.10 | 0.3716 | -138.933 | 1.49022 | 523.0 | 651.22 | 0.0564 | 44 |
| 45 | o-Xylene | C ₈ H ₁₀ | 106.167 | 291.91 | 0.2643 | -13.32 | 1.50017 | 541.6 | 674.85 | 0.0557 | 45 |
| 46 | m-Xylene | C ₈ H ₁₀ | 106.167 | 282.35 | 0.3265 | -54.16 | 1.49177 | 512.9 | 650.95 | 0.0567 | 46 |
| 47 | p-Xylene | C ₈ H ₁₀ | 106.167 | 280.98 | 0.3424 | 55.87 | 1.49039 | 509.2 | 649.47 | 0.0572 | 47 |
| 48 | Styrene | C ₈ H ₈ | 104.152 | 293.40 | 0.2582 | -23.14 | 1.54937 | 587.8 | (703.)* | 0.0534 | 48 |
| 49 | Isopropylbenzene | C ₉ H ₁₂ | 120.194 | 306.27 | (0.188) | -140.838 | 1.48607 | 465.4 | 676.2 | 0.0569 | 49 |
| 50 | Methyl alcohol | CH ₃ O | 32.042 | 148.41 | 4.631 | -143.77 | 1.32443 | 1174. | 463.01 | 0.0590 | 50 |
| 51 | Ethyl alcohol | C ₂ H ₅ 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 ₂ | 44.010 | -109.235* | — | -69.81* | 1.00038* | 1089.5 | 87.73 | 0.0342 | 53 |
| 54 | Hydrogen sulfide | H ₂ S | 34.082 | -76.49 | 394.67 | -121.86* | 1.00057* | 1300. | 212.40 | 0.0461 | 54 |
| 55 | Sulfur dioxide | SO ₂ | 64.065 | 14.11 | 85.46 | -103.84* | 1.00059* | 1143. | 315.7 | 0.0305 | 55 |
| 56 | Ammonia | NH ₃ | 17.0305 | -27.98 | 211.9 | -107.85* | 1.00033* | 1647. | 270.2 | 0.0681 | 56 |
| 57 | Air | N ₂ +O ₂ | 28.9625 | -317.81 | — | — | 1.00028* | 546.9 | -221.30 | 0.0517 | 57 |
| 58 | Hydrogen | H ₂ | 2.0159 | -423.130* | — | -434.824* | 1.00013* | 187.5* | -400.3* | 0.5101* | 58 |
| 59 | Oxygen | O ₂ | 31.9988 | -297.317* | — | -361.826* | 1.00027* | 731.4 | -181.41 | 0.0367 | 59 |
| 60 | Nitrogen | N ₂ | 28.0134 | -320.436 | — | -345.995* | 1.00028* | 492.8 | -232.49 | 0.0510 | 60 |
| 61 | Chlorine | Cl ₂ | 70.9054 | -29.12 | 157.3 | -149.70* | 1.3735* | 1157. | 290.69 | 0.0280 | 61 |
| 62 | Water | H ₂ 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 |

Static Equilibrium Capacity vs. Relative Humidity for Selected Solid Desiccants⁴³

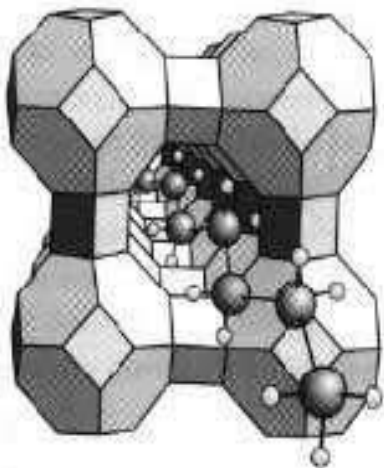


SOLUBILITE DE L'EAU DANS LA CHARGE DE GPL

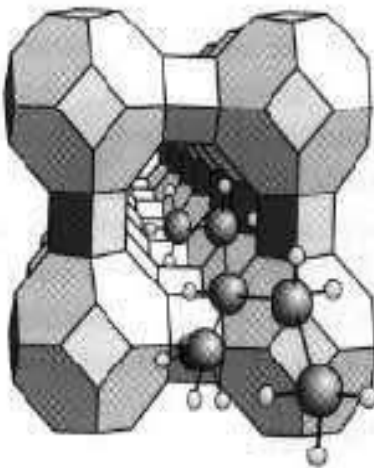
- Note 1. Calcul selon la procédure API
- 2. Source de charge = 13 (moyenne)



Annexe 10 : Tamis moléculaires



Structure de zéolithe de type A

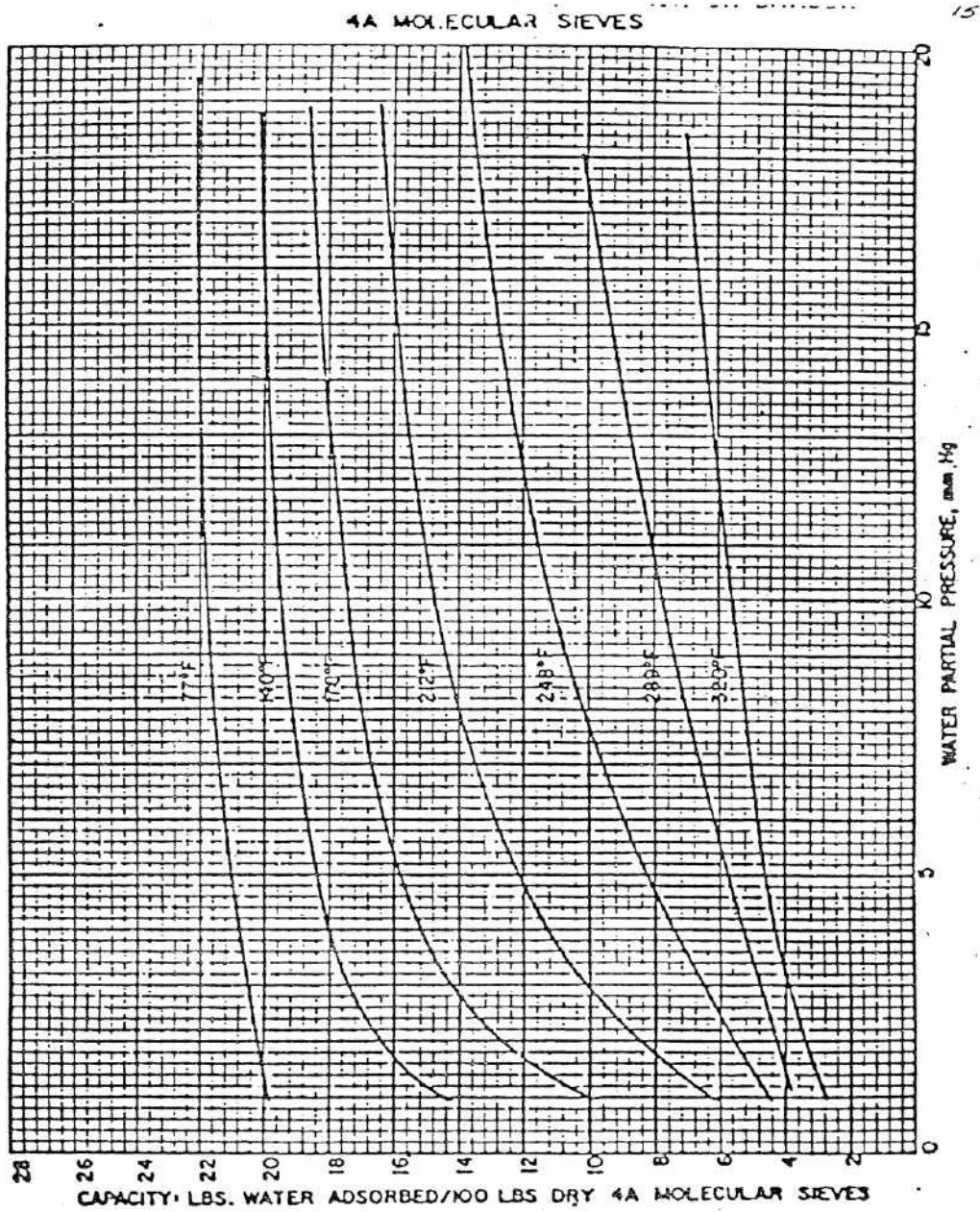


Structure de zéolithe de type X



Annexe 11 :

Capacité d'adsorption de l'eau en fonction de température



Annexe 12 :

