



Department of Process Engineering

قسم هندسة الطرائق

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

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option: **GÉNIE DES PROCÉDÉS DES MATÉRIAUX**

THÈME

**Optimisation du fonctionnement de la section déshydratation du
complexe GP1Z**

Présenté par

1-BENTATA Mohamed

2-BOUKHORISSA Ali

Soutenu le 03 /06 / 2025 devant le jury composé de :

Président :	Terkhi Mohamed Cherif	Grade : MCA	Université de Mostaganem
Examineur 1:	Bouacherine Belkacem	Grade : MCB	Université de Mostaganem
Examineur 2 :	Sefir Yamina	Grade : MCA	Université de Mostaganem
Examineur 3 :	Bouzid Habib	Grade : Pr	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Guermoud Nor Eddine	Grade ; MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Nous remercions Allah pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné pour achever ce travail dans les meilleures conditions.

Nous exprimons nos remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail et pour avoir accepté de l'examiner et de le juger.

Nos remerciements s'adressent aussi à notre encadreur Dr. Nor Eddine GUERMOUD Maître de conférences à l'université de Mostaganem pour avoir accepté de nous encadrer et de superviser toutes les étapes de travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants de l'université de Mostaganem et en particulier les enseignants de la Faculté des Sciences et de la Technologie pour nous avoir permis d'avoir le niveau que nous avons aujourd'hui.

Nous tenons également à remercier le chef de production, ainsi que toute l'équipe Sonatrach de GPI/Z, du secteur formation et stages au secteur production et laboratoire et en particulier Mr Sakhri Karim de nous avoir permis d'effectuer le stage de mise en situation professionnel.

Que nos familles trouvent en ces termes l'expression sincère d'une gratitude et d'une reconnaissance pour n'avoir jamais lésiné sur quoi que ce soit pour notre bien être culturel et corporel ainsi que pour leurs encouragements permanents. Nous espérons qu'ils peuvent être fiers de ces moments.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تحسين أداء وحدة تجفيف غاز البترول المسال (GPL) في منشأة صناعية، من خلال زيادة مدة الامتصاص في المجفف مع الحفاظ على فعالية العملية. تسعى الدراسة إلى تقليل استهلاك الغاز الطبيعي المستخدم في عملية التجديد، وإطالة عمر المناخل الجزيئية. تم اعتماد طريقة حساب دقيقة للتحقق من جدوى هذه الاستراتيجية دون التأثير سلبًا على أداء النظام. وأظهرت النتائج أن زيادة وقت الامتصاص تؤدي إلى تقليل عدد دورات التجديد، مما يحقق مكاسب مهمة من حيث الطاقة والتكلفة والعمر التشغيلي للمعدات

الكلمات المفتاحية: تجفيف – غاز البترول المسال – منخل جزيئي – تجديد – وقت الامتصاص – تحسين – اقتصاد الطاقة.

Summary

This dissertation focuses on optimizing the operation of the LPG feed dehydration unit in an industrial facility. The main objective is to extend the adsorption time of the dehydrator while maintaining the efficiency of the process, in order to reduce natural gas consumption used for regeneration and increase the lifespan of molecular sieves. A rigorous calculation method was applied to verify the feasibility of this optimization without compromising system performance. The results confirm that increasing the adsorption time reduces the number of regeneration cycles, leading to significant energy, economic, and technical benefits.

Keywords: Dehydration – LPG – Molecular sieve – Regeneration – Adsorption time – Optimization – Energy saving.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'optimisation de la section de déshydratation de la charge GPL dans une unité industrielle. L'étude vise à prolonger le temps d'adsorption du déshydrateur sans altérer les performances du procédé. L'objectif est de réduire la fréquence des cycles de régénération, ce qui diminue la consommation de gaz naturel utilisé pour cette phase, tout en prolongeant la durée de vie des tamis moléculaires. Une modélisation mathématique rigoureuse a été mise en œuvre afin de vérifier la faisabilité de cette optimisation. Les résultats ont démontré que l'augmentation du temps d'adsorption permet d'améliorer l'efficacité énergétique et de générer des gains techniques et économiques substantiels.

Mots clés : Déshydratation – GPL – Tamis moléculaire – Régénération – Temps d'adsorption
– Optimisation – Économie d'énergie

Table des matières

Introduction	1
CHAPITRE I Description du complexe de GP1/Z	
I.1 Généralités	4
I.2 Les installations du complexe GP1Z	5
I.2.1 Les installations de stockage d'alimentation	5
I.2.2 Les installations de production	6
I.2.3 les installations de stockage des produits finis	7
I.2.4 Les installations de chargements	8
I.2.5 Les installations d'utilité	8
I.3 Notions et généralités sur les GPL	9
I.3.1 L'origine des GPL	9
I.3.2 Les caractéristiques des GPL	9
I.3.3 L'utilisation des GPL	10
I.3.4 Risques des GPL	11
CHAPITRE II Systèmes de déshydratation industrielle : du principe aux tamis moléculaires	
<i>Partie I</i> Généralités sur la section de déshydratation	
II.1.1 Généralités	14
II.1.2 Le cycle de régénération	14
II.1.2.1-Drainage	14
II.1.2.2-Dépressurisation	15
II.1.2.3 Chauffage.....	15
II.1.2.4 Refroidissement	16
II.1.2.5 Remise sous pression.....	17
II.1.2.6 Remplissage en liquide	17

Partie 2 Les modes de déshydratation et Tamis moléculaires

II.2.1 Généralités	20
II.2.2 Les modes de déshydratation.....	20
II.2.2.1 Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates	20
II.2.2.2 Déshydratation par absorption dans un liquide	20
II.2.2.3 Déshydratation par adsorption sur un desséchant solide	21
II.2.3 Les tamis moléculaires	25
II.2.3.1 Généralités	25
II.2.3.2 Les hydrates	28
PROBLEMATIQUE	30

CHAPITRE III Optimisation de la section de déshydratation de la charge

III.1 Introduction	33
III.2 Constitution d'un déshydrateur de charge	34
III.3 Étude technique et énergétique du procédé de déshydratation	34
III.3.1 Dimensionnement d'un déshydrateur	35
III.3.2 Bilan de matière de la régénération.....	40
III.3.3 Calcul du bilan thermique	46
III.3.3 Etude des trois solutions.....	54
III.4 Choix de la Solution Optimale	64
III.5 Comparaison entre les deux Solutions Optimales.....	65
III.6 Représentation graphique des avantages de solution optimale	66
Conclusion général	69
Bibliographie	72
Annexes	74

Liste des figures

Figure 1: Schéma du procédé GPL.	4
Figure 2 : Schéma du procédé de liquéfaction du GPL.....	5
Figure 3 : Schéma principale de procédé du GPL.....	9
Figure 4 : La demande nationale de GPL.....	10
Figure 5 : Profil de température de régénération.....	16
Figure 6 : Schéma de la section déshydratation.	18
Figure 7 : L'emplacement de la zone ZMT.	22
Figure 8 : La courbe de percée.	23
Figure 9 : Tableaux de diamètres critiques de certaines molécules	26
Figure 10 : Evolution de la concentration de l'adsorbat (fluide) au cours de l'adsorption.	27
Figure 11: Le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau.....	66
Figure 12: Quantité de GN utilisé pendant un an en fonction de la teneur en eau pour la première solution.....	67
Figure 13: Le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau.....	67
Figure 14: Quantité de GN utilisé pendant un an en fonction de la teneur en eau pour la deuxième solution	68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les étapes de cycle de régénération.....	14
Tableau 2 : Vitesse et diamètre du lit.....	28
Tableau 3 : La fiche technique du tamis moléculaire	34
Tableau 4 : Composition de la charge du GPL	35
Tableau 5 : Récapitulation des résultats totaux.....	45
Tableau 6 : La composition du gaz de régénération (voir annexe 6).....	46
Tableau 7 : Récapitulation des résultats du bilan thermique	52
Tableau 8 : les résultats obtenus par la deuxième solution.....	62
Tableau 9 : Les différentes hauteurs du lit non utilisés lors de la déshydratation	63
Tableau 10 : Les résultats obtenus par la troisième solution	64
Tableau 11 : L'influence du temps de régénération sur l'adsorption.....	65
Tableau 12 : L'influence du temps d'adsorption sur le temps de régénération	66

Abréviations

BOG	(Boil of gaz) le nom de station de récupération et liquéfaction des gaz évaporées au niveau du complexe GP1Z
BTU	(British thermal unit) l'unité de chaleur thermique dans le système d'unités anglais
Lb	l'unité de poids dans le système d'unités anglais
ft	(Foot) l'unité de longueur dans le système d'unités anglais
Yin	La teneur en eau dans la charge GPL
PSI	(Psia) unité de pression
Nm³	Normal m ³
PDS	Détecteur de pression

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction

Le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) s'impose aujourd'hui comme un acteur majeur dans le paysage énergétique mondial, en se positionnant comme une alternative sérieuse aux combustibles traditionnels tels que le kérosène et le naphta. En raison de ses propriétés physico-chimiques intéressantes, de sa disponibilité relative et de ses moindres impacts environnementaux, le GPL attire de plus en plus l'attention des industries, des gouvernements et des consommateurs à la recherche de solutions énergétiques à la fois économiques, sûres et durables.

Il fut un temps où l'énergie était perçue comme une ressource abondante et peu coûteuse. Dans ce contexte, les entreprises industrielles ne considéraient pas la consommation énergétique comme un enjeu stratégique. Cependant, avec l'évolution des prix de l'énergie à l'échelle mondiale, la raréfaction progressive des ressources fossiles, et les exigences croissantes en matière de durabilité, la donne a radicalement changé. Aujourd'hui, la maîtrise de la consommation énergétique est devenue une priorité majeure dans tous les secteurs industriels. Elle se place au même niveau que d'autres considérations critiques telles que la sécurité, la gestion des risques, la protection de l'environnement, et le contrôle de la qualité [1].

Dans cette optique, les industries modernes ne visent plus uniquement la maximisation du profit ou l'accroissement de la production brute. Leur démarche s'oriente désormais vers l'optimisation globale des processus : améliorer les rendements, réduire les pertes, limiter les consommations superflues, et tirer le meilleur parti des installations existantes sans recourir systématiquement à de lourds investissements.

C'est précisément dans ce cadre que s'inscrit notre projet de mise en situation professionnelle, mené au sein du complexe industriel GP1/Z. Notre mission consiste à étudier le fonctionnement de la section de déshydratation de la charge, où une consommation énergétique anormalement élevée a été constatée. Une telle situation représente non seulement un surcoût économique, mais elle compromet également l'efficacité globale de l'unité.

Notre objectif est donc double : identifier les causes de cette surconsommation et proposer des solutions concrètes et applicables, sans pour autant perturber le fonctionnement normal de l'unité ni nécessiter d'investissements importants. Il s'agira, à travers une approche

INTRODUCTION GENERALE

Rigoureuse d'analyse et d'optimisation, de contribuer à une gestion plus rationnelle de l'énergie, en parfaite adéquation avec les exigences actuelles de performance industrielle et de développement durable.

Dans un premier temps, nous présenterons une vue d'ensemble du complexe industriel GP1/Z, afin de situer le contexte général de notre étude et de mieux comprendre l'environnement technique dans lequel s'inscrit notre intervention.

Ensuite, nous nous attarderons plus spécifiquement sur la section de déshydratation de la charge, en en décrivant le fonctionnement, les équipements impliqués ainsi que son rôle au sein du procédé global.

La troisième étape consistera à identifier les origines de la surconsommation énergétique observée dans cette section. Pour ce faire, nous réaliserons un calcul détaillé des échanges thermiques impliqués dans l'ensemble du procédé de déshydratation.

Enfin, nous procéderons à l'élaboration du bilan massique de la colonne d'adsorption, en nous appuyant sur les données disponibles et en suivant une méthodologie rigoureuse visant à assurer la fiabilité de nos résultats.

Cette approche nous permettra d'établir un diagnostic précis de la situation et de proposer des pistes d'optimisation concrètes.

Afin de nous assurer de la validité de la méthode de calcul, nous effectuons les calculs d'abord pour un sécheur fonctionnant selon le design et conforterons les résultats obtenus à la réalité.

Nous proposerons en suite, une série de solution ou recommandations, pour remédier à cette problématique.

Nous terminerons, enfin, notre étude par une conclusion dans laquelle les résultats trouvés seront récapitulés, suivie de quelques recommandations.

CHAPITRE I

Description du complexe de GP1/Z

I.1 Généralités

Le complexe de Production GPL dénommé GP1Z ou « JUMBO GPL » de l'entreprise nationale SONATRACH est le dernier né des ensembles industriels de la zone d'arzew. Il est situé entre les centrales thermiques Mers El Hadjadj à l'est et les complexes de GNL à l'ouest [2].

Le " JUMBO GPL " s'étend sur une surface de 120 hectares sur la bande de terre comprise entre la Route National 11 et le Bord de la Mer Méditerranée.

Le Complexe a été construit dans le cadre d'un contrat clé en main avec le concours d'un Consortium Japonais IHI- CITON, a été réceptionné le 02 Septembre 1984.

Le Complexe a pour mission de produire du Butane; Propane et du mélange Butane / Propane à partir du GPL provenant du grand Sud Algérien: Complexe Hassi Messaoud, Hassi R'Mel, Ain Amenas etc [2].

La Capacité annuelle de production de l'Usine est de 10,8 million de Tonne par an. Par sa situation géographique proche du marché et par ses capacités de production, le GP 1Z fait occuper une place de choix à la SONATRACH dans le marché International des GPL.

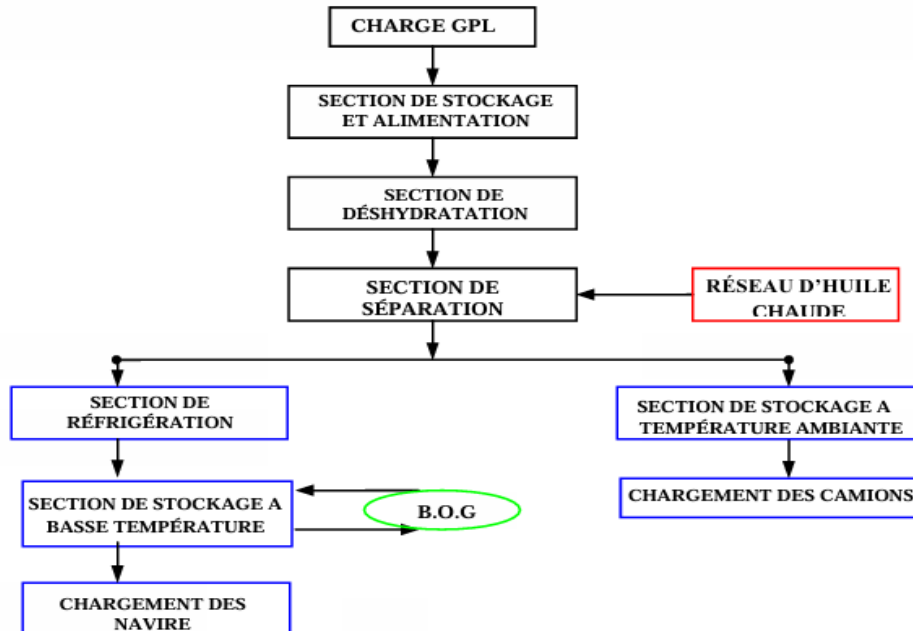


Figure 1: Schéma du procédé GPL.

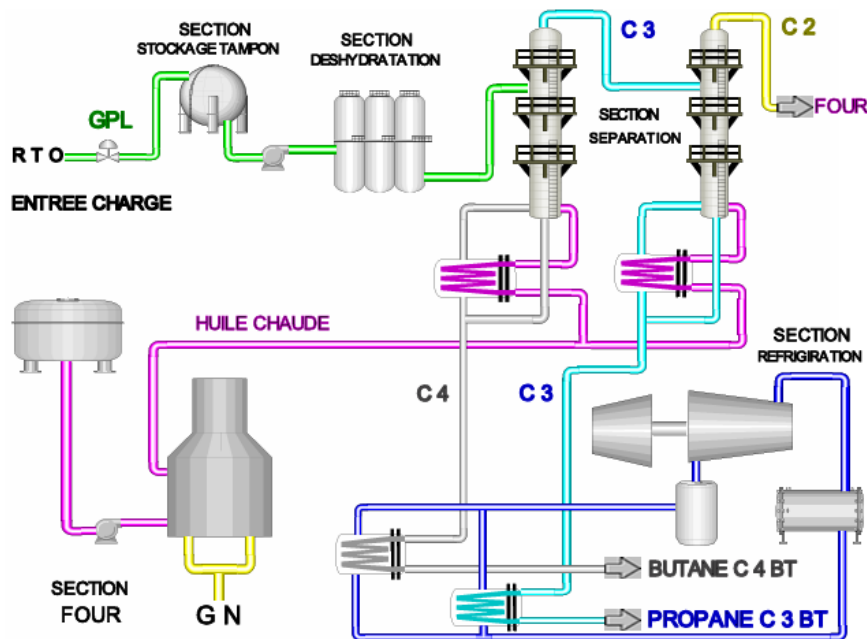


Figure 2 : Schéma du procédé de liquéfaction du GPL.

I.2 Les installations du complexe GP1Z

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

- ✓ Les installations de stockage d'alimentation.
- ✓ Les installations de Production GPL.
- ✓ Les installations de Stockage des Produits Finis.
- ✓ Les installations de Chargement.
- ✓ Les installations d'Utilité [2].

I.2.1 Les installations de stockage d'alimentation

Ces Installations se composent de vingt-deux sphères qui stockent temporairement la charge, et ont une capacité globale de 22000 m³, et de 1000 m³ chacune. Les vingt-deux sphères sont réparties en quatre groupes comportant chacun quatre sphères et quatorze pompes d'alimentations plus un nouveau groupe qui comporte six sphères : dont trois groupes pour la phase I et un seul groupe identique pour la phase II, et un seul groupe identique pour la phase III [2].

I.2.2 Les installations de production

Ces installations comprennent neuf (09) trains de production dont trois nouvellement installés { phase III), et chaque train est composé des sections suivantes :

✚ Section de déshydratation

Cette Section permet d'éliminer l'eau contenue dans le GPL d'alimentation en utilisant des Tamis moléculaires qui adsorbent les molécules d'eau afin d'éviter tout givrage dans la Section de réfrigération.

L'étude de la section de déshydratation sera détaillée dans le chapitre suivant, étant donné son étroite relation avec le sujet traité [2, 4].

✚ Section de séparation de GPL

Cette section a pour but de séparer le GPL brut en produits commerciaux (propane (C3) et butane (C4) éventuellement (C5), avec un taux de récupération Tr maximum :

$$Tr = \frac{C3 \text{ et } C4 \text{ produit (commercialisé)}}{C3 \text{ et } C4 \text{ contenant dans la charge}}$$

La composition du GPL brut est le paramètre primaire qui détermine le fonctionnement global de la section séparation.

La charge passe tout d'abord par le fractionnateur qui sépare le produit de tête (le propane et l'éthane) et le produit de fond (le butane et le pentane). Les équipements de la section séparation sont :

❖ Le fractionnateur

La séparation du propane et de butane dans le fractionnateur est l'opération essentielle pour réaliser le taux de récupération voulu de chaque produit.

- La température d'entrée du fractionnateur est de 71°C.
- La pression à l'intérieur de la colonne est en moyenne de 20 Kg/cm².

❖ Le déethaniseur

Cette colonne de fractionnement est mise en service lorsque le rapport $C_2 / (C_2 + C_3)$ dans la charge est supérieur ou égal à 4.8 % (molaire), elle traitera le produit de tête du fractionnateur.

- L'alimentation se fait normalement sous forme de liquide sous-refroidi à 50°C.
- La pression à l'intérieur de la colonne est de 22 Kg/cm².

❖ Le dépentaniseur

Le dépentaniseur qui traitera le produit de fond sera mis en marche, lorsque le rapport $C_5 / (C_5 + C_4)$ est supérieur ou égal à 1,75 % -

- La température d'alimentation est de 60°C ;
- La pression d'alimentation est de 7 Kg/cm².

Notons qu'il n'existe que deux dépentaniseur pour tous les trains.

✚ Section de réfrigération

Cette section est conçu pour réfrigérer le propane et le butane commercial produit dans la section séparation, les réfrigère jusqu'aux basses températures correspondant au point de saturation liquide et les dirige vers les bacs de stockage à basse température -

Les produits propane et butane sont réfrigérés à travers trois (03) échangeurs suivant un cycle fermé utilisant une boucle de réfrigération à propane [2].

✚ Section d'huile chaude

La section du fluide caloporteur est utilisée comme source de chaleur pour les rebouilleurs et le pré chauffeur final du fractionnateur.

Le four du fluide caloporteur fournit la chaleur nécessaire au gaz de régénération destiné à la section de déshydratation.

- La température d'entrée de l'huile dans le four est de 130°C ;
- La température de sortie de l'huile du four est de 180°C [2].

I.2.3 les installations de stockage des produits finis

Elles comprennent Deux Sections :

✚ Section de stockage des produits

Cette section assure le stockage des produits finis. Elle comprend : huit bacs de stockage à basse température dont :

- Quatre bacs pour le propane à T = -42 °C ;
- Quatre bacs pour le butane à T = -7 °C.

La capacité de chaque bac est de 70000 m³.

Cinq sphères de stockage à température ambiante dont :

- Une sphère pour le propane à P = de 3,8 à 18 Kg/ cm² ;

- Trois sphères pour le butane à $P =$ de 0,5 à 6,5 Kg / cm² ;
- Une sphère pour le pentane à $P =$ de 0,1 à 1,3 Kg /cm² ;
- La capacité de chaque sphère est de 500 m³.

✚ Section de récupération des gaz évaporés (Boil of Gas)

Le but de cette récupération est la liquéfaction des gaz d'évaporation pour les renvoyer dans les systèmes de stockage.

Ces gaz d'évaporation proviennent des différentes capacités de l'usine (ex. les bacs de stockage et l'évaporation des gaz contenus dans les citernes, des navires au moment de leur chargement) [3].

I.2.4 Les installations de chargements

Les produits stockés sont expédiés vers les acheteurs par deux façons différentes.
Expédition par navires : cela concerne les produits à basse température (marché extérieur).
Expédition par camions : destinée au marché national et concerne les produits à température ambiante.

✚ Section de chargement de bateaux à basse températures

Deux systèmes de chargements sont respectivement installés au bout des jetées D₁ et M₆, le débit de chargement est le suivant [7] :

- Propane Maximum 10 000m³/hr.
- Poste D1 4 000 m³/hr.
- Poste M6 10 000 m³/hr.
- Butane..... maximum 10 000 m³.

✚ Section de chargement de camions à température ambiante

Dans cette zone s'effectue le chargement du butane et du propane à température ambiante à partir de quatre (04) Sphères.

Les sphères sont alimentées par les sections de séparation (Voir le schéma de principe de procédé).

I.2.5 Les installations d'utilité

Les utilités sont tout produit autre que les matières premières et les produits Finis qui participent activement à leur fabrication (énergie électrique, production de vapeur, d'air comprimé, d'eau distillé, azote, méthanoletc.) [2].

I.3 Notions et généralités sur les GPL

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

Cette propriété permet les stocker dans un volume réduit (1 m³ de GPL liquide occupe un volume de 225 m³ à l'état gazeux).

Les GPL appartiennent à la famille des paraffines et sont composés essentiellement du CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀ et C₅H₁₂ [1,14].

I.3.1 L'origine des GPL

Les gaz de pétrole liquéfiés sont obtenus principalement :

- Dans les raffineries de pétrole, en cours de la distillation du pétrole brut.
- Au cours des opérations de dégazolinage du gaz naturel sur les champs de
- Production, pour obtenir les produits condensables (butane et propane).
- Une grande partie des GPL proviennent des champs pétroliers.

I.3.2 Les caractéristiques des GPL

Aux conditions normales de pression et de température, les GPL sont des gaz plus lourd que l'air (figure 3).

Le butane commercial en phase vapeur est deux fois plus lourd que l'air, et le propane commercial est une fois et demi plus lourd.

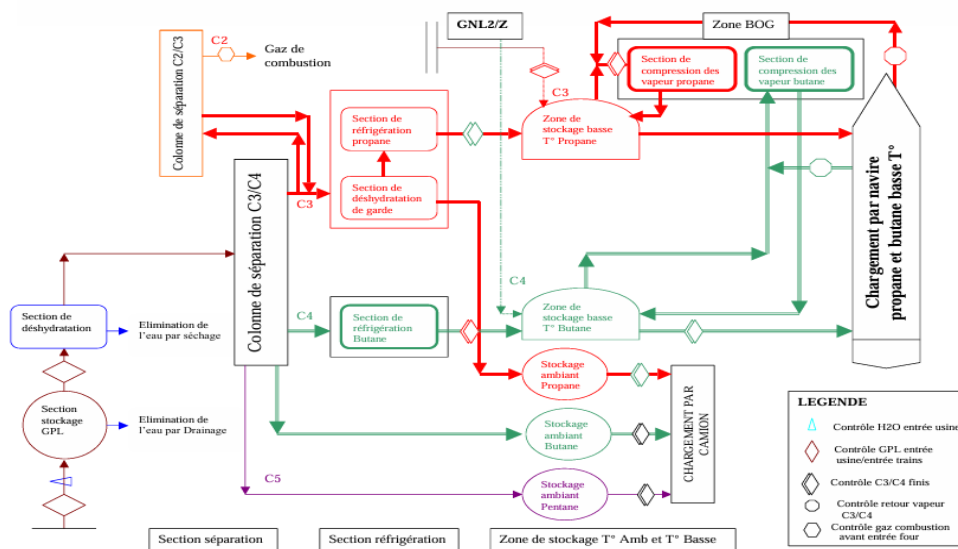


Figure 3 : Schéma principale de procédé du GPL.

Les GPL sont non corrosifs à l'acier et généralement au cuivre et à l'alliage du cuivre et d'aluminium.

- ✓ Les GPL sont incolores, que ce soit en phase liquide ou vapeur.
- ✓ Les GPL sont légèrement toxiques à l'état liquide ou vapeur.
- ✓ Les GPL purs sont inodores, pour des raisons de sécurité, un odorant doit être ajouté.

I.3.3 L'utilisation des GPL

Parmi les principales utilisations des GPL, on peut citer :

- ❖ La combustion (carburant auto).
- ❖ La climatisation : deux principes peuvent être réalisés :
 - Les GPL absorbent la chaleur de l'environnement et créent du froid.
 - Un moteur qui fonctionne aux GPL peut entraîner un compresseur qui comprime ce gaz, la détente absorbe de la chaleur et crée du froid.
- ❖ Matières premières pour l'industrie .exemple : Utilisation des GPL dans les centrales pour la création d'électricité.

A- 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 (GPL /C) comme le montre la figure 4.

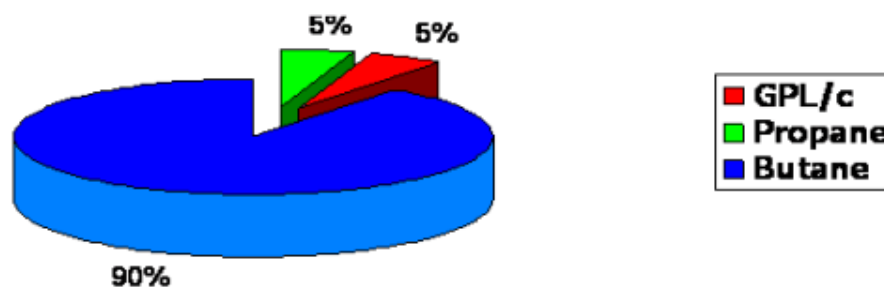


Figure 4 : La demande nationale de GPL.

I.3.4 Risques des GPL

- Les GPL sont fréquemment stockés à l'état liquide sous pression, la fuite du liquide peut, par évaporation rapide, donner un grand volume de gaz inflammable.
- La limite inférieure d'inflammabilité du gaz est approximativement à 2 % du volume du gaz dans l'air .Une petite portion de gaz dans l'air peut donner un mélange inflammable qui peut être allumé par un élément chaud ou une étincelle à une distance d'un point de fuite.
- Les GPL liquides par évaporation rapide et diminution (chute) de température de l'entourage, peuvent causer des brûlures sévères. Des vêtements de protection doivent être portés (des gants, des lunettes).

CHAPITRE II

**Systemes de déshydratation industrielle
: du principe aux tamis moléculaires**

CHAPITRE II

Partie 1

Généralités sur la section de
déshydratation

II.1.1 Généralités

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

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

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

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

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

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

II.1.2 Le cycle de régénération

Tableau 1 : Les étapes de cycle de régénération [4].

Etapes	Temps (h)	Pression (bar)	Température (°C)
Drainage	1	20	30
Dépressurisation	0.5	4.5	30
Réchauffage	11	4.5	280
Refroidissement	5	4.5	12.7
Pressurisation	0.5	20	45
remplissage	1	30	30

II.1.2.1-Drainage

Dès que V-1001B est mis en ligne, la vanne 2A se ferme. Après la fermeture de cette vanne, la séquence de régénération commence avec le drainage du GPL restant dans la

colonne d'adsorption. Le GPL brut est évacué vers les réservoirs sphériques d'alimentation sous la pression du gaz naturel (20 kg/cm^2) eff introduit en haut de la colonne,

Les vannes 3A et 4A s'ouvrent pour refouler le GPL vers les réservoirs sphériques d'alimentation, à l'état liquide. A ce moment, LS-1, un contact de niveau est mis en service.

Lorsque le niveau liquide atteint LS-1, la vanne 3A et ensuite la vanne 4A se ferment. L'opération de drainage est alors terminée et LS-1 est mis hors service.

Le temps prévu pour le drainage est d'environ une heure.

II.1.2.2-Dépressurisation

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

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

Lorsque PDS-2 signale un débit zéro, la vanne 11 se ferme automatiquement la vanne 7A reste ouverte. La pression dans la colonne est alors de $4,5 \text{ kg/cm}^3$ eff. La dépressurisation demande environ une demi-heure.

II.1.2.3 Chauffage

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

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

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

L'aéro réfrigérant est mis en service pour refroidir le gaz sortant du lit et pour condenser une partie de l'eau contenue dans le gaz. Le gaz refroidi entre dans le séparateur de

drainage où l'eau libre est séparée et s'écoule sous contrôle du niveau, vers les égouts des eaux huileuses.

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

La période de chauffage demande 11 heures, ensuite le cycle est arrêté par le programmeur et par TS-1 qui signale que le fond du lit a atteint sa température de régénération de 280°C (figure 5).

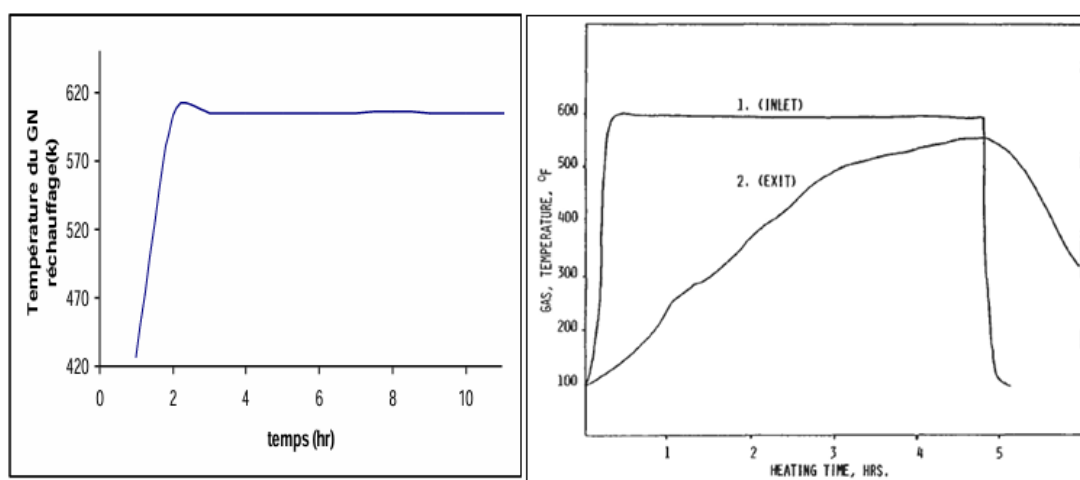


Figure 5 : Profil de température de régénération [15]

II.1.2.4 Refroidissement

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

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

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

Le gaz utilisé pendant la séquence de refroidissement continue à s'écouler vers le réseau de fuel gaz.

Après le refroidissement, les vannes du lit 9, 7A et 5 se ferment et TS2 est mis hors service.

II.1.2.5 Remise sous pression

Avant de pouvoir réintroduire du GPL liquide dans la colonne, V- 1001A doit être remis sous pression par du gaz naturel (20 kg/cm² eff.) pour éviter une détente du GPL brut et ainsi une perte du produit.

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

La pression augmente dans la colonne jusqu'au point de tarage de PDS-3. La vanne 4A se ferme alors et PDS-3 est mis hors service. La pression dans V-1001A atteint alors 20 kg/cm² eff.

L'opération de remise sous pression dure environ une demi-heure.

II.1.2.6 Remplissage en liquide

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

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

La vanne (V-1001A) a alors achevé le cycle de régénération et se trouve en réserve. La durée de disponibilité en réserve est de 53 heures. La durée totale de la régénération est de 15 heures.

Dix-sept heures (17 h) plus tard, le cycle d'adsorption de V-1001B est achevé et son cycle de régénération commence. V-1001C est mis en ligne et commence son cycle d'adsorption tandis que V-1001A reste en réserve. La figure 2 montre clairement le fonctionnement de la section de déshydratation

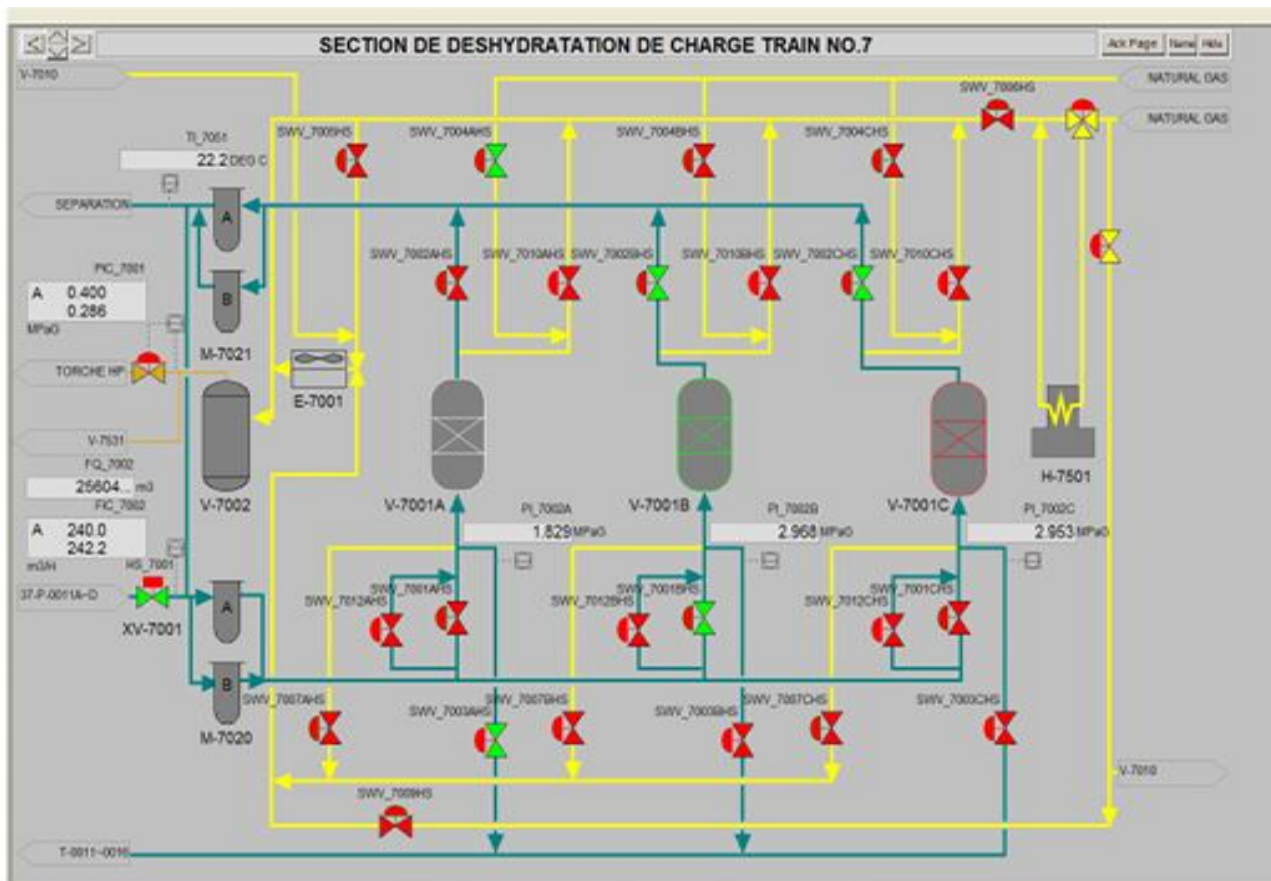


Figure 6 : Schéma de la section déshydratation.

CHAPITRE II

Partie 2

Les modes de déshydratation et
Tamis moléculaires

II.2.1 Généralités

Diverses méthodes ont été appliquées pour éviter l'obturation des conduites de transport ou des installations de traitement des GPL par les hydrates. La plus courante est : la réduction de la teneur en eau par la déshydratation.

II.2.2 Les modes de déshydratation

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

- Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates.
- Déshydratation par absorption dans le liquide.
- Adsorption sur un agent desséchant solide activé [6,9].

II.2.2.1 Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates

Injection de glycol

La formation des hydrates pendant le refroidissement peut être inhibée par :

Injection de glycol liquide, l'éthylène glycol, le di éthylène glycol ; ce dernier est le plus utilisé à cause de son faible cout et du fait qu'il est le moins soluble dans les hydrocarbures liquides.

Le glycol absorbe l'eau, empêchant d'atteindre les conditions dans lesquelles les hydrates d'hydrocarbures solides peuvent se former.

Injection de méthanol

Le méthanol est souvent injecté dans un courant gazeux pour empêcher la formation d'hydrates.

Mais des injections intermittentes de méthanol sont fréquemment utilisées lorsqu'il existe une légère formation d'hydrates.

II.2.2.2 Déshydratation par absorption dans un liquide

Pour pouvoir être utilisé pour la déshydratation ; un liquide absorbant doit avoir de nombreuses caractéristiques telles que :

- Affinité élevée pour l'eau.
- Non corrosif et non coûteux.
- Stabilité de sa régénération.
- Faible pression de vapeur à la température de contact.

- Déshydratation Faible tendance à former une mousse et une faible viscosité

En effet deux composés organiques répondent d'une manière satisfaisante à toute ces exigences : Le di-éthylène glycol (DEG) et le tri-éthylène glycol (TEG).

II.2.2.3 Déshydratation par adsorption sur un desséchant solide

✚ Généralités

L'adsorption fait partie des opérations physiques de séparation des mélanges elle se manifeste, lorsqu'on met en contact un fluide et un solide, par une différence de composition entre la phase adsorbée au voisinage immédiat du solide, et la phase fluide.

L'étude des équilibres d'adsorption permet de connaître le degré maximal de séparation susceptible d'être obtenu dans des conditions thermodynamiques données.

La vitesse avec laquelle on s'approche de l'état d'équilibre relève de l'étude de la cinétique de l'adsorption ; celle-ci dépend de la vitesse avec laquelle les constituants du mélange à séparer diffusent dans l'adsorbant et dans le fluide et, par suite, des conditions thermodynamiques dans lesquelles s'effectue le contact. Elle aboutit à la détermination de l'efficacité d'un appareillage [9].

✚ Description du phénomène d'adsorption

Quel que soit la nature des forces auxquelles il est soumis, un atome situé à la surface d'un solide se distingue d'un atome situé en profondeur du fait que la résultante des forces qui lui sont appliquées est différente de zéro.

Les molécules, ions ou atomes formant la surface d'un solide sont soumis à des forces dissymétriques qui se traduisent par un champ de forces attractives .Ce champ a une portée limitée à des distances de l'ordre de grandeur des dimensions des atomes (quelques Å°).

Il est tout de même suffisant pour attirer les molécules de gaz (ou de liquide) situées au voisinage immédiate l'interface .Ce sont des forces qui provoquent la fixation des molécules à la surface.

L'adsorption d'un fluide par un solide se manifeste donc par l'existence, à l'interface solide fluide d'une couche ou la répartition des molécules est différente de celle régnant au sein du fluide.

Si on plonge un adsorbant dans un fluide, la composition de ce dernier varie plus au moins vite jusqu'à atteindre une valeur d'équilibre

L'adsorption est un processus spontané toujours exothermique.

Suivant la grandeur des énergies mises en jeu, le phénomène d'adsorption présente des caractéristiques qui permettront de le classer soit dans la catégorie de l'adsorption physique soit dans l'adsorption chimique.

✚ La zone de transfert de masse (ZMT)

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

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

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

La zone de transfert de masse est égale à 1/3 de la zone de saturation, il est également courant d'ajouter 0.3 à 0.6 m de desséchant au fond du lit qui agissent comme sécurité pour éviter de faire sortir le point de percée du lit [1,9].

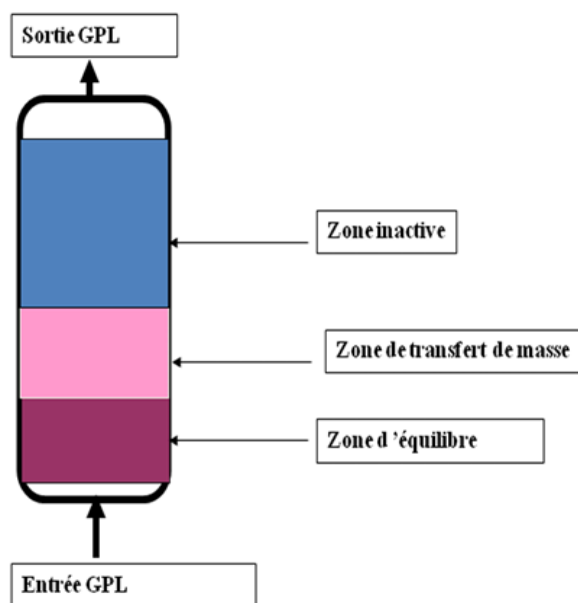


Figure 7 : L'emplacement de la zone ZMT.

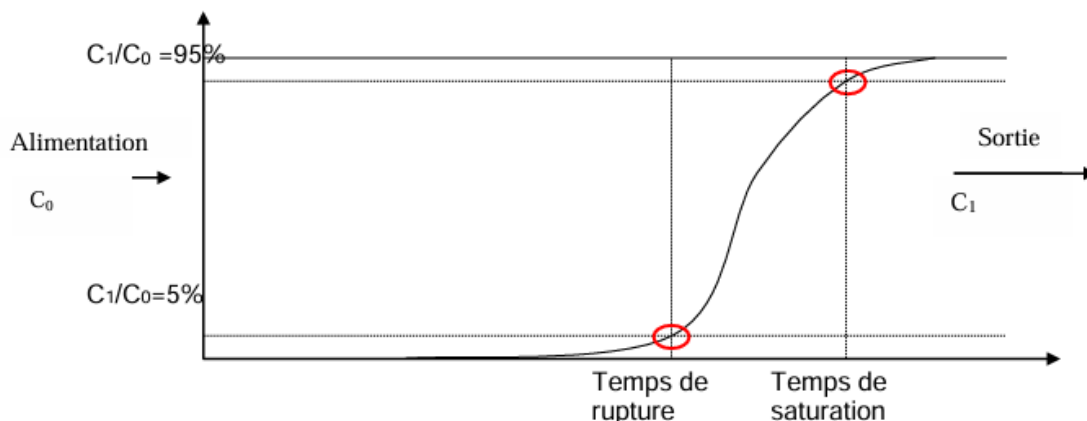


Figure 8 : La courbe de percée.

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

La Z.M.T est une fonction de :

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

✚ Principaux adsorbants

Il existe quatre agents desséchants importants utilisés qui sont :

Le silicagel ; l'aluminagel ; l'alumine activée; le charbon actif et le tamis moléculaire.

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

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

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

Au fur et à mesure que le diamètre de ce pore se rapproche du diamètre de la molécule à adsorber les forces de condensation commencent à se concentrer [9].

❖ Silicagel

Le silicagel est disponible dans le commerce sous forme d'un matériau en poudre ou en granulés de tailles différentes, ce matériau peut être représenté par la formule $(\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$.

Il est amorphe et fortement poreux ; les pores ayant un diamètre moyen de 40.

Il a la capacité d'adsorption d'eau la plus élevée (40 kg H_2O /100 kg Silicagel)

Il permet d'avoir un point de rosée de $-60\text{ }^\circ\text{C}$ (10 ppm).

❖ L'alumine activée

L'alumine active est une forme amorphe, poreuse et partiellement hydratée de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) sa capacité d'adsorption est inférieure à celle du silicagel, et elle permet d'avoir un point de rosée de $-75\text{ }^\circ\text{C}$ (1ppm).

❖ L'aluminagel

L'Aluminagel est capable de réduire la teneur en eau d'un fluide à environ point de rosée de $-60\text{ }^\circ\text{C}$ (10 ppm); Par conséquent ses capacités de séchage extraordinaires sont similaire a celles du silicagel et inférieure à celle de l'alumine activée.

❖ Charbon actif

Les charbons actifs sont des bons adsorbants pour les hydrocarbures et les matières organiques en général ; ils sont surtout utilisés pour la récupération des solvants

Cet adsorbant peut être préparé à partir d'un certain nombre de matières premières dont les principales sont : les coquilles de noix et le charbon, son traitement s'effectue thermiquement en absence d'air.

Les charbons actifs sont disponibles sous formes de granules. Et ils sont régénérés à une température qui ne doit pas dépasser les $150\text{ }^\circ\text{C}$.

❖ Tamis moléculaire (voir l'annexe 7)

Les tamis moléculaires sont des aluminosilicates cristallisés de telle manière qu'ils forment une structure moléculaire poreuse dont les diamètres des pores sont parfaitement définis. Un tamis moléculaire est capable d'adsorber environ 10 % de son poids en eau. Il est régénéré par un passage du gaz sec à $280\text{ }^\circ\text{C}$.

II.2.3 Les tamis moléculaires

II.2.3.1 Généralités

Les tamis moléculaires sont différents des agents adsorbants traditionnels principalement par leur aptitude à adsorber des petites molécules tout en excluant de grandes molécules, si bien que des séparations peuvent être effectuées sur les différences de taille des molécules (voir l'annexe 4 et 7).

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

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

Les tamis moléculaires sont des aluminosilicates de métaux hydratés cristallins offrant un certain nombre de propriétés inhabituelles. Les types commerciaux importants de tamis moléculaires sont faits de matière synthétique mais leur structure est relativement similaire à certains minéraux naturels pour être classifiés comme zéolites. Bien que les structures cristallines de certains tamis moléculaires sont différentes, (deux types, A et X, sont les plus importants voir Annexe 2, figure (1), leur importance autant qu'agents adsorbants commerciaux vient du fait que dans chacun d'eux, les cristaux contiennent des cavités d'interconnexion de dimensions uniformes, séparées par des ouvertures plus étroites, ou pores uniformes.

Molécule	Diamètre critique (A)
Hydrogène	2,4
Acétylène	2,4
Oxygène	2,8
Monoxyde de carbone	2,8
Dioxyde de carbone	2,8
Azote	3,0
Eau	2,8
Ammoniac	3,6
Sulfure d'hydrogène	3,6
Méthane	4,0
Ethylène	4,2
Ethane	4,4
Méthanol	4,4
Ethanol	4,4
Mercaptan méthylique	4,5
Propane	4,9
Propylène	5,0
Mercaptan éthylique	5,1
Butène	5,1
1,3-Butadiène	5,2
Chlorodifluorométhane (R-22)	5,3
Thiophène	5,3
i-Butane à 1-C ₂₂ H ₄₆	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

Tableau 2 : diamètres critiques de certaines molécules [15] .

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

Les tamis moléculaires ayant des propriétés constantes tel que les données d'équilibre ; qui se représentent sous forme d'une isotherme l'Annexe (01); il représente une relation d'équilibre existant entre le fluide et le solide .la concentration de l'adsorbant, qui dans notre cas est constitué par l'eau, est une fonction à la fois de la concentration de l'eau dans la phase fluide (pression partielle) et de la température d'adsorption.

Les tamis moléculaire sont également caractérisés par leur capacité d'adsorption relativement élevée aux faibles concentrations du matériau adsorbé, et ont une affinité élevée pour les composés de type polaire et non saturé.

✚ Adsorption dynamique

L'adsorption est un phénomène de surface qui correspond à la fixation des molécules d'un fluide à la surface d'un solide. Les solides poreux, qui présentent une grande porosité interne et dont la surface développée de support est de l'ordre de plusieurs centaines de m^2/gr de par leur structure cristalline à pores de dimensions bien déterminées, ont une sélectivité d'adsorption maximale [13].

En adsorption dite dynamique, le lit granulaire de matériau adsorbant, placé dans une colonne d'adsorption ou adsorbent. Est percolé par le fluide vecteur contenant les molécules à séparer par adsorption.

✚ Concept de la zone de transfert de masse

La zone de transfert de masse correspond à la longueur du lit nécessaire au phénomène d'adsorption, ou la concentration de l'adsorbat à la sortie varie en fonction de la concentration initiale. En amont de la zone de transfert, l'adsorbant est saturé. En aval, l'adsorbant est vierge ou régénéré, est prêt à travailler.

L'importance de la zone de transfert de masse dépend principalement :

- De la cinétique d'adsorption de l'adsorbat.
- Des caractéristiques thermodynamiques du fluide.
- De la vitesse linéaire superficielle.
- Du type, de la forme et de la granulométrie du tamis moléculaire [1].

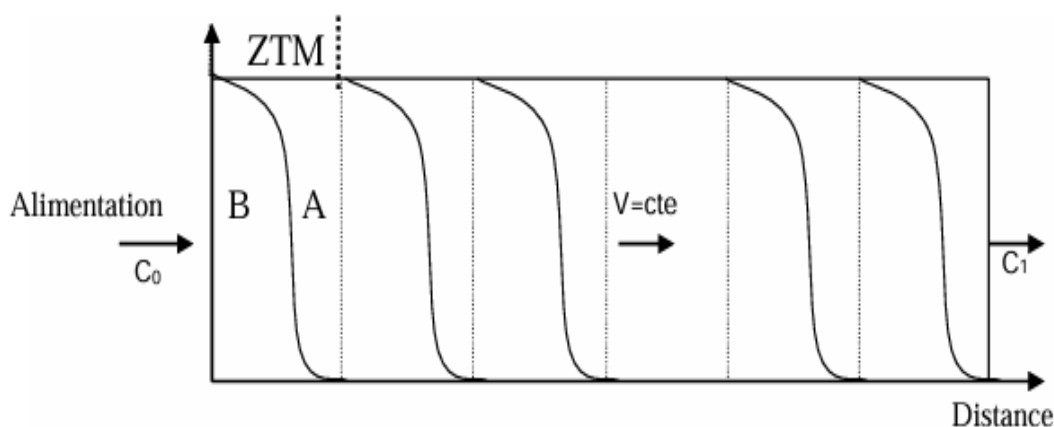


Figure 9 : Evolution de la concentration de l'adsorbat (fluide) au cours de l'adsorption.

✚ Effet des variables de conception du lit

L'adsorption est en fait un procédé cinétique, La zone de transfert de masse correspond à la longueur du lit nécessaire au phénomène d'adsorption, c'est-à-dire à la distance que doit parcourir une unité de fluide pour sa concentration d'eau d'entrée chute à essentiellement zéro, La longueur de cette zone est fonction de plusieurs facteurs [1,8].

- **Vitesse et diamètre du lit**

En général, les lits longs et de faibles diamètres sont plus efficaces que les lits courts de grands diamètres.

Le tableau 2 donne trois configurations de lit pour le séchage de l'air sur tamis moléculaire .Bien que tous fonctionnent correctement, il convient de remarquer l'efficacité plus élevée des lits de petit diamètre [13].

Tableau 2 : Vitesse et diamètre du lit.

Tamis moléculaire	Capacité utile Adsorp d'eau (%)	Diamètres du lit (ft)	Haut du lit (ft)	chute de P (Psi)
8900	10	4.5	12.1	4.3
9610	9.3	6	7.4	0.9
10200	8.7	7	5.8	0.4

- **Teneur en adsorbat de l'effluent**

La capacité utile du lit adsorbant dépend en outre de la teneur en adsorbat désirée dans l'effluent. Puisque la longueur de la zone de transfert de masse augmente lorsque l'on désire diminuer la concentration de l'effluent.

Une faible concentration en adsorbat se traduit par de faible capacité d'adsorption.

II.2.3.2 Les hydrates

- **Définition**

Les hydrates sont des combinaisons physiques entre l'eau et les autres composés pour produire un solide qui a l'apparence d'un glaçon mais possédant une structure différente que celle d'un glaçon [9].

- **Les formules chimiques des hydrates**

Il y a deux structures pour les hydrates des GPL.

Des petites molécules qui forment des corps cubiques centrés (structure I) tels que (CH_4 , C_2H_6 , H_2S) et des grandes molécules tels que (C_3H_8 , i- C_4H_{10}) qui ont la forme d'un diamant (structure II).

- **Les conditions de formations d'hydrates**

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

- ✓ **Les conditions primaires**

- Le gaz doit être à ou au-dessous de son point de Rosée.
- La présence d'eau libre.
- Basse température.
- Haute pression [9].

- ✓ **Les conditions secondaires**

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

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

PROBLEMATIQUE

Problématique

Le système de déshydratation de charge du complexe GP1/Z a été conçu pour traiter une charge GPL contenant initialement une teneur en eau de 100 ppm. Or, suite à un prétraitement en amont, notamment pour les charges provenant du sud, cette concentration a chuté de manière significative, atteignant des valeurs inférieures à 25 ppm. Cette diminution persistante entraîne un sous-emploi notable du lit d'adsorption, qui fonctionne en dessous de sa capacité optimale, ce qui génère des pertes économiques importantes et une consommation d'énergie inutile, notamment durant les phases de régénération non justifiées.

Dès lors, comment peut-on adapter le fonctionnement de la section de déshydratation de charge aux nouvelles conditions d'alimentation à faible teneur en eau, de manière à :

- Optimiser l'exploitation du lit d'adsorption,
- Réduire les pertes énergétiques liées aux cycles de régénération excessifs,
- Prolonger la durée de vie du dessicant,
- Et maintenir la qualité du produit final et la continuité de la production sans investissements majeurs.

CHAPITRE III

Optimisation de la section de
déshydratation de la charge

III.1 Introduction

Dans l'industrie gazière, la déshydratation des charges constitue une étape cruciale pour garantir l'efficacité et la sécurité des procédés en aval. L'eau, même en faible quantité, peut entraîner des réactions indésirables, la corrosion des équipements, ou la formation d'hydrates dans les systèmes de transport. Ainsi, l'optimisation de la section de déshydratation devient essentielle pour améliorer la performance globale de l'unité, réduire les coûts d'exploitation, prolonger la durée de vie des équipements et répondre aux exigences de qualité du produit final. Cette étude s'inscrit dans une démarche d'amélioration continue visant à identifier les leviers techniques et opérationnels permettant de maximiser l'efficacité du procédé tout en minimisant la consommation énergétique et les pertes de matière.

L'objectif principal de cette partie du travail est d'améliorer les performances de la section de déshydratation de la charge en affinant le pilotage du cycle d'adsorption. Cela passe par la détermination précise du temps d'adsorption optimal, permettant à l'adsorbant de fonctionner efficacement jusqu'à atteindre son point de saturation, en tenant compte de la teneur en eau présente dans la charge. Parallèlement, une attention particulière est portée à l'optimisation des paramètres du cycle de régénération thermique, dans le but de réduire la consommation énergétique, limiter les pertes de matière et prolonger la durée de vie des lits adsorbants, tout en maintenant un haut niveau de performance opérationnelle.

Pour ce faire, la partie calcul de notre travail s'articule autour de trois axes principaux :

- ✓ Le bilan thermique
- ✓ Le bilan de matière
- ✓ Le dimensionnement d'un déshydrateur

Les bilans thermiques et matière représentent des étapes clés de notre démarche, car ils permettent de quantifier avec précision la chaleur requise ainsi que le débit de gaz naturel (GN) nécessaire pour effectuer une régénération efficace du lit adsorbant. Par la suite, le dimensionnement du déshydrateur vise à adapter les caractéristiques de l'équipement aux exigences du procédé, en fonction des conditions opératoires et de la charge à traiter. Cette approche globale permet d'optimiser à la fois la performance énergétique et la capacité de traitement du système de déshydratation.

III.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 [3,7]. Le tableau 3 regroupe les principales caractéristiques du tamis.

Tableau 3: La fiche technique du tamis moléculaire [3]

Diamètre nominal des pores	4°A
Diamètre des particules	1,6 mm
Densité tassée	700 kg / m ³
Chaleur de désorption de l'eau	1800 BTU / Lb d'eau
Teneur en eau résiduelle	1,5%
Capacité en eau à l'équilibre	22% (T=25 °C, P=17.5mmHg)
Capacité calorifique	0,22 kcal / kg °C

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

- ✓ Durée d'adsorption : 36 heures.
- ✓ Durée de régénération : 19 heures.
- ✓ Réchauffage = 11 heures.
- ✓ Refroidissement = 5 heures [3].

✚ Température d'entrée du gaz de régénération

- ✓ Réchauffage T = 280°C.
- ✓ Refroidissement T= 12,7°C.

III.3 Étude technique et énergétique du procédé de déshydratation

Avant de commencer les calculs, une vérification de la méthode est réalisée en recalculant un cas de référence avec un taux de traitement de 100 %, afin de valider la quantité de chaleur nécessaire à la régénération ainsi que le débit de gaz approprié. Cette étape assure la fiabilité des résultats à venir.

✚ Propriété du GPL

- Débit de traitement à 100% : $Q = 240 \text{ m}^3/\text{hr} = 8675,09 \text{ ft}^3/\text{hr}$
- $P = 30,7 \text{ Kg} / \text{cm}^2$
- $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tableau 4: Composition de la charge du GPL [4]

Composant	Mi (g/mole)	% molaire
C1	16.047	0.24
C2	30.07	1.92
C3	44.097	59.37
i-C4	58.123	13.68
n-C4	58.123	24.54
i-C5	72.15	0.02
n-C5	72.15	0.05
C6	86.177	0.00

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

$M_{\text{GPL}} = 49,19 \text{ Kg} / \text{Kmole}$

- ✓ Solubilité de l'eau dans le GPL à $T=25^\circ\text{C}$ (380 ppm /mol) (voir Annexe 2)
- ✓ Teneur en eau à l'entrée du sécheur : $X_E = 100 \text{ ppm}$.
- ✓ Teneur en eau à la sortie du sécheur : $X_s = 1 \text{ ppm}$.
- ✓ Phase: liquide
- ✓ Masse volumique du GPL : $\rho_{\text{GPL}} = 530 \text{ Kg} / \text{m}^3 = 33,09 \text{ Lb} / \text{ft}^3$.

III.3.1 Dimensionnement d'un déshydrateur

1) Diamètre minimum du lit

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

$$D_{\min} = \left[\frac{(4 \times (\rho_{\text{GPL}} \times Q))}{\pi \times G} \right]^{0.5}$$

Avec

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 / hr).

G : Vitesse massique de l'écoulement de fluide (Lb /ft² .hr) [12].

La vitesse massique de l'écoulement à travers les tamis moléculaires peut être exprimée à l'aide de la relation suivante :

$$G = 3600 \times (C \times \rho_{\text{tamis}} \times \rho_{\text{GPL}} \times D_p)^{0.5}$$

Avec

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

ρ_{tamis} : Masse volumique du dessicant (Lb/ ft³)

C : Constante relative aux tamis moléculaire ($C = 1,06$)

AN :

$D_p = 0.01$ ft.

$\rho_{\text{GPL}} = 530 \text{ kg/m}^3 = 33.0868 \text{ Lb/ft}^3$

$\rho_{\text{tamis}} = 640 \text{ kg/m}^3 = 39.9539 \text{ Lb/ft}^3$

$C = 1.06$

$Q = 240 \text{ m}^2/\text{hr} = 8675.09 \text{ ft}^3/\text{hr}$

$$G = 13476.0435 \text{ Lb/ft}^2 \cdot \text{hr}$$

Donc

$$D_{\min} = 5.15 \text{ ft} = 1.524 \text{ m}$$

2) La hauteur totale du lit

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

$$H_t = H_s + H_z$$

Avec

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

H_z : la longueur de la zone de transfert de masse (ft) [12].

✚ Calcul de la vitesse actuelle d'écoulement de fluide (U_{act})

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

Avec

$$S = \frac{(\pi \times D_L^2)}{4}$$

D_L : le diamètre du lit. ($D_L=2,1 \text{ m}=6,89 \text{ ft}$).

Donc

$$U_{act} = 0.063 \text{ ft/sec} = 3.79 \text{ ft/min}$$

✚ Calcul le débit d'eau

$$q_w = \frac{(4 \times Y_{in} \times Q \times \rho_{GPL})}{(\pi \times D_L^2)}$$

Avec

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

Donc

$$q_w = 0.60 \text{ Lb/ft. hr}$$

✚ Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse

$$H_z = \frac{(225 \times q_w^{0.7895})}{(U_{act}^{0.5506} \times Y_{in}^{0.2646})}$$

Donc

$$H_z = 2.83 \text{ ft} = 0.86 \text{ m}$$

✚ Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre

$$H_s = H_t - H_z$$

Avec

H_t : la hauteur total du lit ($H_t = 2,1 \text{ m} = 6,89 \text{ ft}$).

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

Donc

$$H_s = 4.059 \text{ ft} = 1.21 \text{ m}$$

✚ 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. (Voir l'annexe 5).

$$X_s = 22 - X_1$$

Avec

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 chimiqueEtc. il est convenable d'ajouter une quantité de tamis pour compenser l'effet de vieillissement.

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

Coefficient d'usure = 70 %

La capacité sera en fin de compte égale à :

$$X_s = (22 - X_1) \times 0.7$$

Donc

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

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

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

Avec

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

Donc

$$X = 9.848 \text{ Lb}_{\text{d'eau}}/100\text{Lb}_{\text{de dessicant}}$$

✚ Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads}

$$M_{\text{ads}} = \frac{\left((H_s - (C \times H_z)) \times (X_s \times D_L^2 \times \rho_{\text{tamis}}) \right)}{127.38}$$

Donc

$$M_{\text{ads}} = 595.31 \text{ Lb}$$

✚ Calcul du temps d'adsorption

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

Donc

$$t_{\text{ads}} = 45.03 \text{ hr}$$

✚ Détermination de l'efficacité d'adsorption

$$\text{Eff} = \frac{X}{X_s}$$

Donc

$$\text{Eff} = 68.63$$

III.3.2 Bilan de matière de la régénération

✚ Calcul du débit du gaz de refroidissement

Le débit du gaz de refroidissement est déterminé selon l'expression suivante :

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

Avec

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

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

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

T_e : la température d'entrée du gaz de refroidissement (°F) [12].

$$Q_{\text{ref}} = 3.93 \times 10^5 \text{ BTU/ hr.}$$

$$\Delta H_{(T_{\text{rech}} - T_{\text{ref}})} = 509.70 \text{ BTU/ Nm}^3.$$

$$T_{\text{rech}} = 280 \text{ °C} = 553,150 \text{ °K}$$

$$T_{\text{ref}} = 12,7 \text{ °C} = 285,850 \text{ °K}$$

Donc

$$M_{\text{ref}} = 771.47 \text{ nm}^3/\text{hr}$$

✚ Calcul des pertes de charges

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

La perte de charge par unité de longueur est calculée à l'aide de l'équation modifiée suivante :

$$\frac{\Delta P}{L_1} = (A \times v \times U) + (B \times \rho_{\text{GN}} \times U^2)$$

Ou

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

v : 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 [12].

$$A = 0.0561, B = 0.0000889$$

Le gaz naturel de Réchauffage $T = 280\text{ °C}$ $P = 4,5\text{ kg / cm}^2$

✓ **Calcul de la masse volumique du GN**

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

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

Le facteur de compressibilité est calculé par la formule suivante :

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

Avec P est la pression du travail exprimé en Psia.

$$Z = 1.046\text{ kg/m}^3$$

Donc

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

$$T = 280\text{ °C} = 553,15\text{ °K.}$$

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

$$R = 0,082\text{ L. atm / mole.°K [12].}$$

$$\rho_{GN} = 1.71\text{ kg/m}^3$$

✓ **Calcul de la vitesse superficielle U₁ à travers le lit**

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

Avec

$$S = (\pi \cdot D^2) / 4 \text{ (Voir l'annexe 7).}$$

$$S = 37.26\text{ ft}^2$$

$$\rho_{GN} = 1,77\text{ kg / Nm}^3 = 0,11\text{ Lb / ft}^3.$$

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

Donc

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

✓ Calcul de la viscosité du GN chaud v_1

Le gaz naturel de refroidissement $T = 12,7\text{ °C}$, $P = 4,5\text{ kg / cm}^2$

$v_1 = 0,02$ (Voir annexes 8).

Avec

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

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

$T = 280\text{ °C}$.

$Cp = 0,043\text{ Lb /ft.hr}$ (Voir annexes 8).

Donc

$$\frac{\Delta P}{L_1} = 0.0546\text{ psia/ft}$$

✓ Calcul de Re_1

Le nombre de Reynolds est calculé par la formule suivante :

$$Re = \frac{G \times D_p}{v}$$

Avec

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

$v_1 = 0,02$

$Cp = 0,04\text{ Lb /ft .hr}$

$G = Mg / S = 680,37\text{ Lb/ ft}_2\text{.hr}$

Donc

$$Re_1 = 170.09$$

✓ Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_2$ pour le GN froid

✓ Calcul du coefficient de compressibilité (Z)

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

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad , \quad P_r = \frac{P}{P_c}$$

Avec

T_c, P_c : paramètres pseudo critiques.

T_r, P_r : température et pression réduites.

$$T_c = \sum Y_i \times T_{ci} \quad \mathbf{T_c = 194.3 \text{ }^\circ\text{K}}$$

$$P_c = \sum Y_i \times P_{ci} \quad \mathbf{P_c = 45.12 \text{ atm}}$$

$$\triangleright \mathbf{Z = f(T_r = 1,47 ; P_r = 0,1)}.$$

Et selon l'annexe (9 et 10) :

$$Z = 0,91$$

Et avec

$$M_{GN} = 18,66 \text{ Kg / Kmole.}$$

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

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

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

Donc

$$\mathbf{\rho_{GN} = 3.82 \text{ kg/m}^3}$$

✓ **Calcul de la vitesse superficielle U_2 à travers le lit**

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

Avec

$$S = (\pi \cdot D^2) / 4.$$

$$S = 37.17 \text{ ft}^2$$

$$\rho_{GN} = 3.82 \text{ kg / Nm}^3 = 0,24 \text{ Lb / ft}^3.$$

$$M_g = M_{ref} = 710,08 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1,31 \times 10^3 \text{ Lb / hr}$$

Donc

$$\mathbf{U_2 = 15.37 \text{ ft/min}}$$

✓ Calcul de la viscosité du GN froid ν_2

Connaissant la densité relative d_r et la pression de régénération

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

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

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

$$\nu_2 = 0,01, C_p = 0,03 \text{ Lb /ft.hr (Voir annexes 8).}$$

D'après l'équation

$$\frac{\Delta P}{L_2} = (A \times \nu_2 \times U_2) + (B \times \rho_{GN} \times U_2^2)$$

$$\frac{\Delta P}{L_2} = \mathbf{0.03 \text{ psia/ft}}$$

✓ Calcul de Re_2

Le nombre de Reynolds est calculé par la formule suivante :

$$Re_2 = \frac{G \times D_p}{\nu_2}$$

Avec

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

$$\nu_2 = 0,01$$

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

$$G = M_g / S = 241.56 \text{ Lb/ ft}_2\text{.hr}$$

Donc

$$\mathbf{Re_2 = 91.18}$$

✚ Récapitulation des résultats

Le tableau 5 regroupe les résultats obtenus lors des calculs d'optimisation de la section de déshydratation de la charge.

Tableau 5: Récapitulation des résultats totaux

Les valeurs calculées	Les valeurs de design
$D = 1,58 \text{ m}$	$D = 2,10 \text{ m}$
$M_t = 4660,93 \text{ Kg}$	$M_t = 4653 \text{ Kg}$
$H_t = 2,1 \text{ m}$	$H_t = 2,1 \text{ m}$
$H_f = 8524472.46 \text{ BTU/hr}$ $= 2333481073.8 \text{ Kcal /hr}$	$0,15 \times 10^6 < H_f < 3,3 \times 10^6 \text{ kcal /hr}$
$t_r = 8.3 \text{ hr}$	$t_r = 11 \text{ hr}$
$t_{ref} = 4,87 \text{ hr}$	$t_{ref} = 5 \text{ hr}$
$M_g = 2000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ $M_{ref} = 771.47 \text{ Nm}^3/\text{hr}$	$1000 < \text{Débit} < 2500 \text{ Nm}^3/\text{hr}$
$\Delta P_1 / L = 0,054 \text{ psi /ft}$ $\Delta P_2 / L = 0,03 \text{ psi /ft}$	$0,01 < \Delta P/L < 0,25 \text{ psi /ft}$
$Re_1 = 170.09$ $Re_2 = 91,18$	$Re > 100$
$t_{ads} = 45.03 \text{ hr}$	$t_{ads} = 36 \text{ hr}$

Après l'application de la méthode de calcul établie, les résultats obtenus confirment sa validité et sa pertinence.

En effet, la perte de charge calculée se situe dans l'intervalle recommandé, garantissant ainsi la possibilité de réaliser l'opération de régénération sans risque de soulèvement du lit.

De plus, la quantité de chaleur fournie par le four répond aux exigences du procédé. Le régime d'écoulement turbulent observé favorise un transfert de masse efficace ainsi qu'une répartition homogène du gaz à travers le sécheur, optimisant ainsi la performance de l'unité.

Les différentes marges de conception ayant été respectées, nous pouvons désormais appliquer notre méthode de calcul au premier cas d'étude, correspondant à une teneur en eau de 25 ppm dans la charge.

III.3.3 Calcul du bilan thermique

✚ Propriété du gaz de régénération [11]

Tableau 6: La composition du gaz de régénération (voir annexe 6)

composant	X _i en mole	T _{ref} (K)=12.7°C	T _{rech} (K)=280°C	ΔH° (Kj/Kg)	M _i (kg/Kmole)	X _i ' en poids	ΔH°×X _i ' (Kj/Kg)
C ₁	0,8386	285.85	553.15	698,3	16	0,72	502,776
C ₂	0,0743	285.86	553.16	599,6	30	0,12	71,952
C ₃	0,0186	285.87	553.17	586,64	44	0,04	23,4656
iC ₄	0,0026	285.88	553.18	591,34	58	0,01	5,9134
nC ₄	0,0008	285.89	553.19	592,58	58	0,002	1,18516
iC ₅	0,004	285.90	553.20	585,59	72	0,02	11,7118
nC ₅	0,0009	285.91	553.21	586,78	72	0,003	1,76034
C ₆	0,0003	285.92	553.22	589,15	86	0,001	0,58915
N ₂	0,0557	285.93	553.23	280,49	28	0,08	22,4392
CO ₂	0,0024	285.94	553.24	253,63	44	0,01	2,5363
He	0,0018	285.95	553.25	0	4	0	0
	1				18,7132	1	644,32895

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

$$M_{GN} = 18,71 \text{ kg / Kmole}$$

- Le gaz naturel de Réchauffage : T= 280 °C, P = 4,5 kg / cm²
- Le gaz naturel de Refroidissement : T= 12,7 °C, P = 4,5 kg / cm²

- **Calcul de la masse volumique du GN dans les conditions**

Normal ρ_{GN} : T=0 °C, P=1 atm.

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

Avec

$$Z = 1.$$

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

$$T = 0 \text{ °C} = 273,15 \text{ °K.}$$

$$P = 1,01351 \text{ kg / cm}^2 = 1 \text{ atm.}$$

$$R = 0,0821 \text{ l .atm / mole.°K}$$

Donc

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

- Calcul de l'enthalpie de chauffage du gaz de 12,7°C à 280°C

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

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

Avec

ΔH : l'enthalpie qui fournit par le four exprimée en (KJ / kg), Tableau (6).

T: le gradient de la température de chauffage du gaz de GN en (°K).

A, B, C, D, E, F : Constantes des compositions de GN de corrélation (voir l'annexe 6).

$$\Delta H = 644.33 \text{ KJ/kg} = 277.02 \text{ BTU/Lb}$$

✚ Calcul de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération

La quantité de chaleur nécessaire à la régénération est :

$$Q_{totale} = Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{dés} + Q_{perte}$$

Avec

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).

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

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

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

- Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q_{tamis}

$$Q_{tamis} = m_t \times Cp_t \times (T - T_{ads})$$

Avec

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

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

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

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

✓ **Calcul de la masse du tamis m_t**

$$m_t = \frac{1}{4} \times (\pi \times D_L^2) \times H_t \times \rho_{\text{tamis}}$$

Ou

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

$$m_t = 10275,5 \text{ Lb}$$

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

$$\rho_{\text{tamis}} = 641 \text{ kg/m}^3 = 40,02 \text{ Lb/ft}^3$$

$$\mathbf{m_t = 10257.51 Lb = 4652.73 kg}$$

✓ **Calcul de la température moyenne du lit en fin de chauffage**

On peut l'obtenir par la relation suivante :

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

Avec

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

$$T_e = 280 \text{ °C} = 536 \text{ °F} = 553,15 \text{ °K.}$$

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

$$T_s = 227 \text{ °C} = 440,6 \text{ °F} = 500,15 \text{ °K}$$

$$\mathbf{T = 200.5 \text{ °C} = 392.9 \text{ °F}}$$

D'après l'équation

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

Avec

$$C_{p_t} = 0,22 \text{ BTU/ Lb °f}$$

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

Donc

$$\mathbf{Q_{\text{tamis}} = 8.86 \times 10^5 \text{ BTU}}$$

- Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage de l'acier Q_{acier}

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

Avec

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

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

✓ Calcul du volume de l'acier (V_c) [12]

$$V_c = (S_{\text{ext}} - S_{\text{int}}) \times L$$

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).

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

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

Avec

E_p : L'épaisseur de l'acier. $E_p = 0.0368$ m,

d : Le diamètre de l'acier. $d = 2.1$ m,

$L = 4.63$ m.

$$V_c = 1.143 \text{ m}^3 = 40.37 \text{ ft}^3$$

✓ Calcul de la masse de l'acier m_c

$$m_c = V_c \times \rho_{\text{acier}}$$

Avec

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

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

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

$$m_c = 2.018 \times 10^4 \text{ Lb}$$

On doit ajouter la quantité d'aciers relatifs aux supports, aux pipes et aux brides estimées à 35% (accessoires).

Donc

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

D'après l'équation :

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

Avec

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

$m_c = 2,73 \ 104 \text{ Lb}$.

$C_{p_c} = 0,12 \text{ BTU / lb. } ^\circ\text{F}$.

Donc

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

- **Calcul des pertes de chaleur $Q_{\text{dés}}$**

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

$$Q_{\text{des}} = M_{\text{ads}} \times \Delta H$$

Avec

La quantité d'eau adsorbée $M_{\text{ads}} = 595.30 \text{ Lb}$.

La chaleur de désorption $\Delta H = 1800 \text{ BTU/Lb}$ [12].

$$Q_{\text{des}} = 1.07 \times 10^6 \text{ BTU}$$

- **Calcul des pertes de chaleur Q_{perte}**

$$Q_{\text{pert}} = 0.1 \times (Q_{\text{dés}} + Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}})$$

Avec

$Q_{\text{des}} = 1,07 \ 10^6 \text{ BTU}$.

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

$Q_{\text{tamis}} = 8.86 \times 10^6 \text{ BTU}$.

Donc

$$Q_{\text{pert}} = 2.98 \times 10^5 \text{ BTU}$$

- Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale}

D'après l'équation

$$Q_{totale} = Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{dés} + Q_{perte}$$

$$Q_{totale} = 3.28 \times 10^6 \text{ BTU}$$

- Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage H_f

$$H_f = \frac{Q_{totale}}{(1/\varepsilon)}$$

Avec

$(1/\varepsilon)$: L'efficacité thermique de four.

- ✓ Calcul de l'efficacité thermique du four $1/\varepsilon$

Efficacité thermique du four pendant le réchauffage :

$$\varepsilon = 2.25 + (0.03113 \times T)$$

Avec

T : Temps de chauffage (hr).

$$\frac{1}{\varepsilon} = 38.57$$

- Calcul de l'énergie totale fournie par le four

- ✓ Calcul de la chaleur totale fournie par le four lors de réchauffage H_f

D'après l'équation

$$H_f = \frac{Q_{totale}}{(1/\varepsilon)}$$

Avec

$$1/\varepsilon = 0,3857$$

$$Q_{totale} = 3,28 \times 10^6 \text{ BTU.}$$

$$H_f = 8.52 \times 10^6 \text{ BTU}$$

- **Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr »**

$$t_r = \frac{H_f}{(\Delta H_{(T_i-T_e)} \times M_g)}$$

Avec

M_g : Le débit du gaz de chauffage (Nm^3 / hr). $M_{GN} = 2000 Nm^3/hr$.

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

t_r : Le temps de chauffage (hr).

Tableau 7: Récapitulation des résultats du bilan thermique

Quantité de chaleur apportée par le GN: H_f (BTU)	8.52×10^6
Déférence de L'enthalpie ($\Delta H_{(280-12.7)^\circ C}$: BTU / Lb)	$277.2 = 644.33 \text{ KJ/kg}$
Masse volumique du ρ_{GN} (Lb/ Nm^3)	$1.839 = 0.834 \text{ kg}/Nm^3$
Température finale (T_e : $^\circ F$)	$536 = 280^\circ C$
Température initiale (T_i : $^\circ F$)	$54,86 = 12,7^\circ C$

Pour ΔH en kJ / Nm^3 : $\Delta H = \Delta H (KJ/ kg) \times \rho_{GN}$

$$\Delta H = 509.70 \text{ BTU}/Nm^3$$

D'après l'équation

$$t_r = \frac{H_f}{(\Delta H_{(T_i-T_e)} \times M_g)}$$

Donc

$$t_r = 8.36 \text{ hr}$$

- **Calcul de la chaleur fournie par le four par de H_f / CYCLE**

$$H_{f/cycle} = \frac{(H_f \times t_r)}{t_{ads}}$$

Avec

$H_f/cycle$: la chaleur fournie par le four par cycle (BTU/hr).

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

$t_r = 8,36 \text{ hr}$ [12].

$$H_f = 8.52 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$t_{\text{ads}} = 45.03 \text{ hr.}$$

Donc

$$H_{f/\text{cycle}} = 1.58 \times 10^6 \text{ BTU/hr}$$

- Calcul du temps de refroidissement du tamis t_{ref}

$$t_{\text{ref}} = \left(\frac{Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}}}{Q_{\text{totale}}} \right) \times t_r$$

Avec

$$Q_{\text{totale}} = 3.28 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

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

$$Q_{\text{tamis}} = 8,86 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_r = 8.36 \text{ hr.}$$

Donc

$$t_{\text{ref}} = 4.87 \text{ hr} \cong 5 \text{ hr}$$

- Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}

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

Avec

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

$$Q_{\text{tamis}} = 8,86 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_{\text{ref}} = 4.87 \text{ hr}$$

$$Q_{\text{ref}} = 3.93 \times 10^5 \text{ BTU/hr}$$

III.3.3 Etude des trois solutions

III.3.3.1 Etude de la première solution

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

- Calcul le débit d'eau

$$q_w = \frac{(4 \times Y_{in} \times Q \times \rho_{GPL})}{(\pi \times D_L^2)}$$

Avec

D_L : le diamètre du lit. ($D_L=2,1 \text{ m} = 6,89 \text{ ft}$).

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/ft^3)

Q : Débit volumique de la charge (ft^3 / hr).

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

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

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.

- Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse

$$H_z = \frac{(225 \times q_w^{0.7895})}{(U_{act}^{0.5506} \times Y_{in}^{0.2646})}$$

Avec

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

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

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

$$H_z = 1.28 \text{ ft} = 0.39 \text{ m}$$

- Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre

$$H_s = H_t - H_z$$

Avec

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

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

Ht : la hauteur total du lit ($H_t = 2,1 \text{ m} = 6,89 \text{ ft}^3$) (Voir annexes 7).

$$H_s = 5.60 \text{ ft} = 1.71 \text{ m}$$

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

- Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads}

$$M_{ads} = \frac{\left((H_s - (C \times H_z)) \times (X_s \times D_L^2 \times \rho_{tamis}) \right)}{127.38}$$

Avec

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

$X_s = 22 \%$ en poids (voir l'annexes 7).

ρ_{tamis} : Masse volumique du tamis

C : Constante relative aux tamis moléculaire.

$$M_{ads} = 1075 \times 10^3 \text{ Lb}$$

Il s'agit de la quantité d'eau que le sécheur est censé adsorber, mais en raison de l'ancienneté de la section de déshydratation, sa capacité d'adsorption s'est réduite, ce qui impose l'utilisation d'un coefficient de correction $C = 0,45$.

- Calcul du temps d'adsorption

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

Avec

q_w : le débit d'eau dans la charge de GPL,

ρ_{tamis} : Masse volumique du dessicant (Lb/ft^3)

Ht: la hauteur total du lit (ft^3 / hr).

$$t_{ads} = 188.40 \text{ hr}$$

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

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

Avec

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

$$X = 12.88 \text{ Lb d'eau / 100 Lb de dessicant}$$

- Détermination de l'efficacité d'adsorption

$$\text{Eff} = \frac{X}{X_S}$$

Donc

$$\text{Eff} = 89.73$$

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

- Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}

$$Q_{\text{des}} = M_{\text{ads}} \times \Delta H$$

Avec

La quantité d'eau adsorbée $M_{\text{ads}} = 1,075 \times 10^3 \text{ Lb}$.

La chaleur de désorption $\Delta H = 1800 \text{ BTU/Lb}$ (Voir annexes 7).

$$Q_{\text{des}} = 1.94 \times 10^6 \text{ BTU}$$

- Calcul la perte de chaleur Q_{perte}

$$Q_{\text{pert}} = 0.1 \times (Q_{\text{dés}} + Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}})$$

Avec

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

$Q_{\text{tamis}} = 8,86 \times 10^5 \text{ BTU}$.

$Q_{\text{des}} = 1.94 \times 10^6 \text{ BTU}$.

$$Q_{\text{pert}} = 3.85 \times 10^5 \text{ BTU}$$

- Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale}

$$Q_{\text{totale}} = Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}} + Q_{\text{dés}} + Q_{\text{perte}}$$

Donc

$$Q_{\text{totale}} = 4.24 \times 10^6 \text{ BTU}$$

- Calcul de la chaleur fournie par le four H_f

D'après l'équation

$$H_f = \frac{Q_{\text{totale}}}{(1/\varepsilon)}$$

Avec

$$1/\varepsilon = 0,39$$

$$Q_{\text{totale}} = 4.24 \times 10^6 \text{ BTU}$$

$$H_f = 1.10 \times 10^7 \text{ BTU}$$

- Calcul du temps de réchauffage du tamis t_r

$$t_r = \frac{H_f}{(\Delta H \times M_{GN})}$$

Avec

M_{GN} : La quantité de chaleur du GN sortant du four exprimé en (Nm^3/hr).

ΔH : La différence de l'enthalpie du gaz de réchauffage (BTU / Nm^3) (Voir annexes 6).

$$t_r = 10.78 \text{ hr}$$

- Calcul de la chaleur fournie par le four pour cycle $H_{f/\text{CYCLE}}$

$$H_{f/\text{cycle}} = \frac{(H_f \times t_r)}{t_{\text{ads}}}$$

Avec

$$t_r = 10.78 \text{ hr.}$$

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

$$t_{\text{ads}} = 188.40 \text{ hr.}$$

$$H_{f/\text{cycle}} = 6.29 \times 10^6 \text{ BTU}$$

- Calcul du temps de refroidissement du tamis t_{ref}

D'après l'équation

$$t_{\text{ref}} = \left(\frac{Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}}}{Q_{\text{totale}}} \right) \times t_r$$

Avec

$$Q_{\text{totale}} = 4.24 \times 10^6 \text{ BTU.}$$

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

$$Q_{\text{tamis}} = 8,86 \times 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_r = 10.78 \text{ hr.}$$

$$t_{\text{ref}} = 4.88 \cong 5 \text{ hr}$$

- Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}

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

Donc

$$Q_{\text{ref}} = 3.39 \times 10^5 \text{ BTU}$$

- Calcul du débit du gaz de refroidissement

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

Avec

$$Q_{\text{ref}} = 3.39 \times 10^5 \text{ BTU/hr.}$$

$$\Delta H_{(T_s - T_e)} = 531,74 \text{ BTU/Nm}^3.$$

$$T_s = 280 \text{ }^\circ\text{C} = 536 \text{ }^\circ\text{F} = 553,15 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$T_e = 12,7 \text{ }^\circ\text{C} = 54,86 \text{ }^\circ\text{F} = 285,85 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$M_{\text{ref}} = 771.48 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

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

- ✓ Calcul de la vitesse superficielle U_1 à travers le lit

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

Avec

$$S = (\pi \cdot D^2) / 4.$$

$$S = 37.26 \text{ ft}^2$$

$$\rho_{\text{GN}} = 1,77 \text{ kg / Nm}^3 = 0,11 \text{ Lb / ft}^3.$$

$$M_g = 2000 \text{ Nm}^3 / \text{hr} = 3,68 \cdot 10^3 \text{ Lb} / \text{hr}$$

Donc

$$\mathbf{U_1 = 120 \text{ ft/min}}$$

✓ **Calcul de la viscosité du GN chaud v_1**

Le gaz naturel de refroidissement $T = 12,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 4,5 \text{ kg} / \text{cm}^2$

$v_1 = 0,02$ (Voir annexes 8).

Avec

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

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

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

$$C_p = 0,043 \text{ Lb} / \text{ft.hr} \text{ (Voir annexes 8).}$$

Donc

$$\frac{\Delta P}{L_1} = \mathbf{0.055 \text{ psia/ft}}$$

✓ **Calcul de Re_1**

Le nombre de Reynolds est calculé par la formule suivante :

$$Re = \frac{G \times D_p}{v}$$

Avec

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

$$v_1 = 0,02$$

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

$$G = M_g / S = 680,37 \text{ Lb} / \text{ft}_2.\text{hr}$$

Donc

$$\mathbf{Re_1 = 170.09}$$

✓ **Calcul de la vitesse superficielle U_2 à travers le lit**

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

Avec

$$S = (\pi \cdot D^2) / 4.$$

$$S = 37.17 \text{ ft}^2$$

$$\rho_{GN} = 3.82 \text{ kg / Nm}^3 = 0,24 \text{ Lb / ft}^3.$$

$$M_g = M_{ref} = 710,08 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1,31 \times 10^3 \text{ Lb / hr}$$

Donc

$$\mathbf{U_2 = 15.37 \text{ ft/min}}$$

- **Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_2$ pour le GN froid**

- ✓ **Calcul de la vitesse superficielle U_2 à travers le lit**

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

Avec

$$S = (\pi \cdot D^2) / 4.$$

$$S = 37.17 \text{ ft}^2$$

$$\rho_{GN} = 3.82 \text{ kg / Nm}^3 = 0,24 \text{ Lb / ft}^3.$$

$$M_g = M_{ref} = 710,08 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1,31 \times 10^5 \text{ Lb / hr}$$

Donc

$$\mathbf{U_2 = 15.37 \text{ ft/min}}$$

- ✓ **Calcul de la viscosité du GN froid v_2**

Connaissant la densité relative dr et la pression de régénération

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

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

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

$$v_2 = 0,01, C_p = 0,03 \text{ Lb / ft.hr (Voir annexes 8).}$$

D'après l'équation

$$\frac{\Delta P}{L_2} = (A \times v_2 \times U_2) + (B \times \rho_{GN} \times U_2^2)$$

$$\frac{\Delta P}{L_2} = \mathbf{0.04 \text{ psia/ft}}$$

✓ Calcul de Re_2

Le nombre de Reynolds est calculé par la formule suivante :

$$Re_2 = \frac{G \times D_p}{v_2}$$

Avec

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

$$v_2 = 0,01$$

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

$$G = Mg / S = 241.56 \text{ Lb/ ft}_2\text{.hr}$$

Donc

$$\mathbf{Re_2 = 91.18}$$

• Interprétation des résultats

Les résultats obtenus ont permis d'atteindre l'objectif de notre étude, en ajustant le temps d'adsorption du déshydrateur de charge, initialement fixé à 36 heures (temps de design), à une nouvelle valeur calculée de 188,40 heures.

Cette modification doit être accompagnée d'un léger ajustement de la durée de régénération 10 heures et 78 minutes pour le réchauffage, 4 heures et 88 minutes pour le refroidissement.

L'augmentation du temps d'adsorption entraînera les effets suivants :

- Une réduction du nombre de cycles dans le temps, ce qui se traduit par une amélioration de l'efficacité du tamis.
- Des pertes de charge au cours des phases de réchauffage et de refroidissement, qui demeurent toutefois dans les limites recommandées.
- Un régime d'écoulement turbulent, favorable au transfert de masse et assurant une distribution homogène des gaz à travers le lit.

III.3.3.2 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. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 8.

Tableau 8: Résultats obtenus par la deuxième solution

Calcul le débit d’eau	0.19 Lb/ft ² .hr
Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse	0.39 m
Estimation de la quantité d’eau adsorbée M_{ads}	1.08×10^3 LB
Calcul de la hauteur de la zone d’équilibre	1.71 m
Calcul de la hauteur non utilisée, H'	0.39 m
Estimation de la quantité réelle d’eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X)	12.88
Détermination de l’efficacité d’adsorption	87%
Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}	1.90×10^6 BTU
Calcul les pertes de chaleur Q_{perte}	3.60×10^3 BTU
Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale}	4×10^6 BTU
Calcul de la chaleur fournie par le four H_f	1.10×10^7 BTU
Calcul du temps de réchauffage du tamis t_r	8.70 hr
Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle $H_{F/CYCLE}$	3.99×10^6 BTU
Calcul du temps de refroidissement du tamis t_{ref}	7.20 hr
Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}	3.20 BTU/hr
Calcul du débit du gaz de refroidissement	750 Nm ³ /hr

Selon les résultats obtenus, il apparaît clairement que la durée de régénération a été modifiée, avec une réduction du temps de chauffage à 8 heures et 70 minutes et une durée de refroidissement de 7 heures et 20 minutes, tout en maintenant inchangée la durée du cycle d'adsorption à 36 heures.

Cette adaptation permet une économie modérée en énergie, puisque la même quantité de gaz naturel est consommée par cycle, même si le temps d'adsorption reste inchangé, ce qui limite l'impact énergétique global.

Durant la phase d'adsorption, le dessiccant (tamis moléculaire) se charge progressivement en humidité jusqu'à atteindre un état de saturation, au-delà duquel il perd sa capacité d'adsorption. Une phase de régénération est donc nécessaire pour restaurer son efficacité, en éliminant l'eau par chauffage. Cependant, dans notre cas, le lit n'atteint pas une saturation complète, ce qui signifie que le chauffage des zones déjà sèches est inutile, et peut même entraîner une dégradation prématurée du tamis, réduisant ainsi son efficacité globale. Ce phénomène a été observé quelle que soit la teneur en eau de la charge

Le tableau 9 présente les hauteurs du lit restées inactives (non exploitées) lors de la déshydratation, pour différentes teneurs en eau, avec un temps d'adsorption fixe de 36 heures

Tableau 9: Les différentes hauteurs du lit non utilisés lors de la déshydratation

Y_{in} (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
H_s (ft)	4.75	4.48	4.77	5.14	5.59
H' non utilisé (ft)	0.00	0.36	0.43	0.48	0.39

III.3.3.3 Etude de la troisième solution

Dans cette partie de travail on va étudier l'impact de la diminution de la masse du tamis sur le fonctionnement de section de déshydratation de charge en comparant les dépenses d'énergies par celles obtenues dans les autres solutions , sans modifier ni le cycle d'adsorption ni celui de la régénération pour la teneur en eau de $Y_{in}=25$ ppm . Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Résultats obtenus par la troisième solution

Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse	0.39 m
Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre	1.69 m
Calcul de la hauteur totale du tamis H_t	1.95 m
Calcul de la masse du tamis m_t	8.65×10^3 Lb
Calcul de la température moyenne du lit en fin de chauffage	496,72 K
Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q_{tamis}	6.95×10^5 BTU
Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}	2×10^6 BTU
Calcul les pertes de chaleur Q_{perte}	4×10^5 BTU
Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale}	4.30×10^6 BTU
Calcul de la chaleur fournie par le four H_f	1.12×10^7 BTU
Calcul du temps de réchauffage du tamis t_r	10.76 hr
Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle $H_{F/CYCLE}$	3.15×10^6 BTU/hr

III.4 Choix de la Solution Optimale

À la lumière de l'ensemble des résultats obtenus, il apparaît que l'optimisation du fonctionnement de la section de déshydratation de la charge ne peut être atteinte que par la mise en œuvre de la solution optimale identifiée, à savoir : l'augmentation du temps d'adsorption du sécheur.

Cette amélioration offre de nombreux avantages pour le système, notamment une réduction du nombre de cycles mensuels, ce qui entraîne directement une diminution de la fréquence des régénérations, avec plusieurs bénéfices associés :

1. Réduction de la consommation de gaz naturel lors de la séquence de refroidissement.
2. Baisse de l'énergie thermique fournie par le four durant la phase de chauffage, celle-ci étant initialement calculée sur la base d'un lit totalement saturé. Chauffer un lit partiellement saturé entraîne en effet une perte d'énergie inutile.
3. Allongement de la durée de vie du tamis moléculaire, grâce à une sollicitation thermique moins fréquente.
4. Réduction des pertes de produit GPL piégé dans le lit pendant la régénération.
5. Amélioration de l'efficacité du tamis, due à la préservation de la structure cristalline et à une moindre dégradation de l'adsorbant.

III.5 Comparaison entre les deux Solutions Optimales

✚ **Première solution** : on fixe le temps de régénération puis on varie le temps d'adsorption (tableau 11).

Tableau 11: L'influence du temps de régénération sur l'adsorption

Teneur en eau en ppm	100	80	60	40	20
Temps d'adsorption	36.99	47.23	64.46	99.32	205.5
Temps de réchauffage	10.29	10.40	10.54	10.68	10.89
Nombre d'heures par ans	8640	8640	8640	8640	8640
Débit de réchauffage	2000	2000	2000	2000	2000
Nombre de cycle pendant un an	5.54	4.45	3.36	2.27	1.14
Nombre de régénération par un an	16.58	13.42	10.13	6.79	3.41
Quantité de GN pour le réchauffage pendant une régénération	20552	20781	21045	21347	21738
Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an	340893	279723	213496	145172	73822
Gain en GN par ans et par train en Nm³		6.42×10^5	6.91×10^5	7.45×10^5	8.05×10^5

✚ **Deuxième solution:** on fixe le temps de d'adsorption puis en varie le temps régénération (tableau 12).

Tableau 12: L'influence du temps d'adsorption sur le temps de régénération

Teneur en eau en ppm	100	80	60	40	20
Temps d'adsorption	36	36	36	36	36
Temps de réchauffage	10.01	8.83	7.72	6.63	5.55
Nombre d'heures par an	8640	8640	8640	8640	8640
Débit de réchauffage	2000	2000	2000	2000	2000
Nombre de cycle pendant un an	187	194	199	204	207
Nombre de régénération par un an	187	194	199	204	207
Quantité de GN pour le réchauffage pendant une régénération	20055	17716	15466	13276	11145
Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an	341013	304086	267870	231976	196410
Gain en GN par ans et par train en Nm³		3.51×10^5	3.58×10^5	3.64×10^5	3.75×10^5

III.6 Représentation graphique des avantages de solution optimale

III.6.1 Prolongation du temps d'adsorption

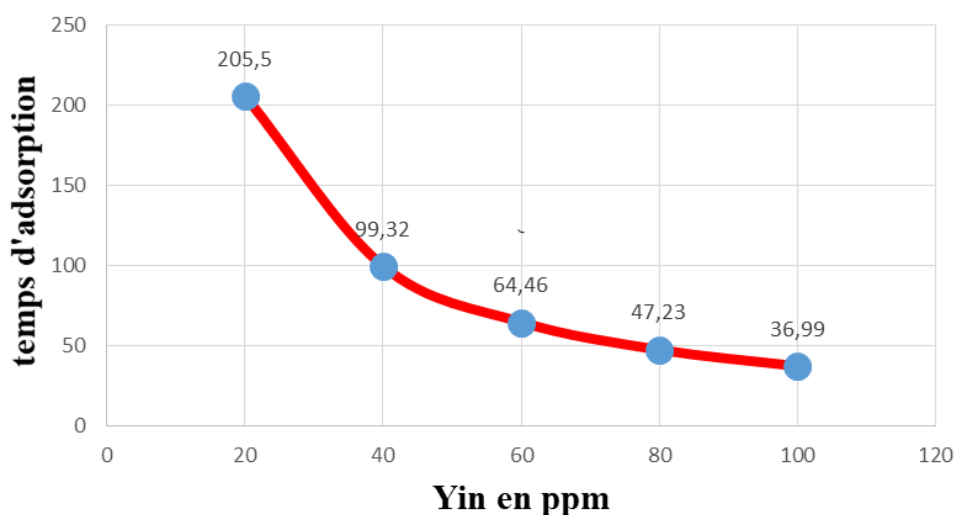


Figure 10: Le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau

Nous remarquons que le temps d'adsorption s'allonge à mesure que la teneur en eau dans la charge de GPL diminue.

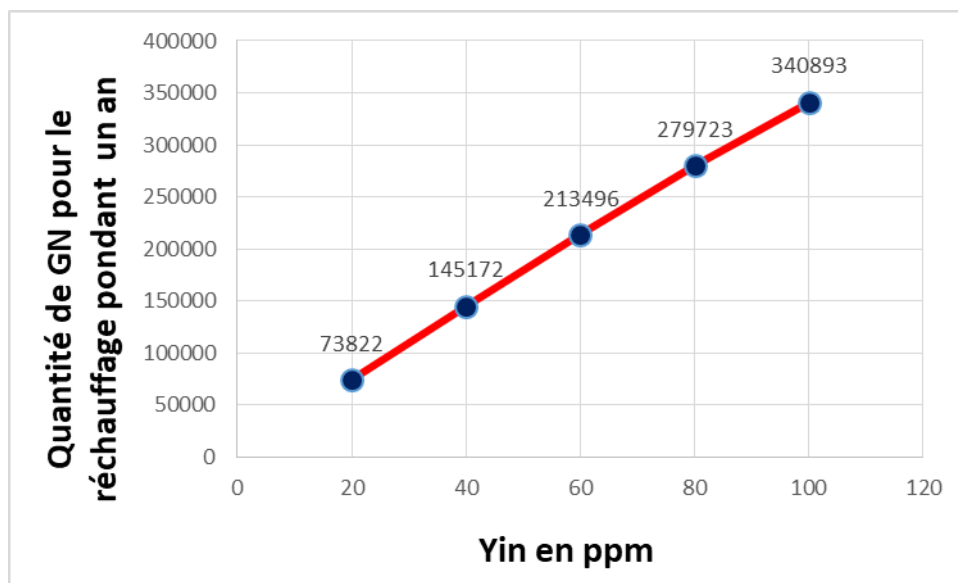


Figure 11: Quantité de GN utilisé pendant un an en fonction de la teneur en eau pour la première solution

Nous remarquons que la quantité du GN utilisée pour les 100 ppm diminue avec la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL.

III.6.2 Modification du temps de régénération

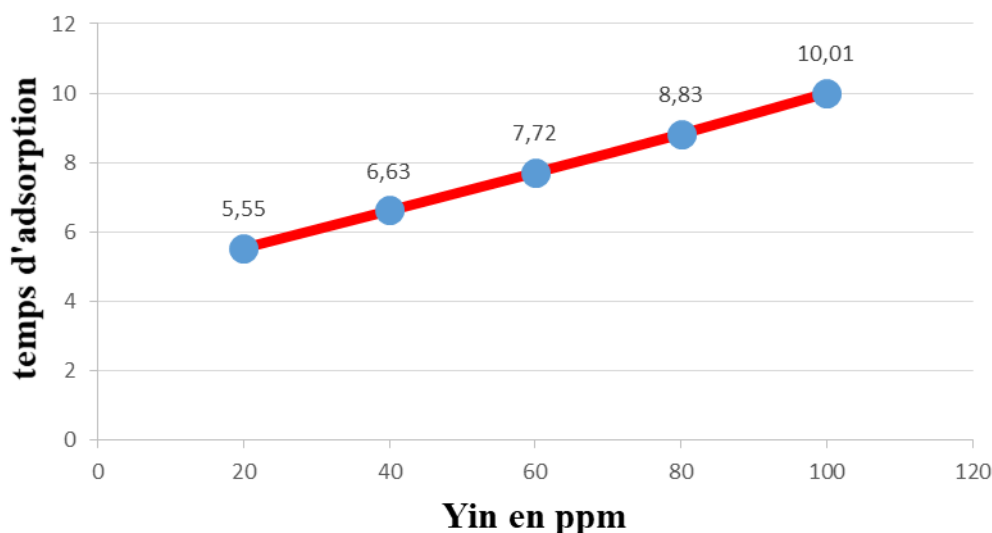


Figure 12: Le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau

Nous remarquons que le temps de régénération diminue proportionnellement à la teneur en eau présente dans la charge de GPL.

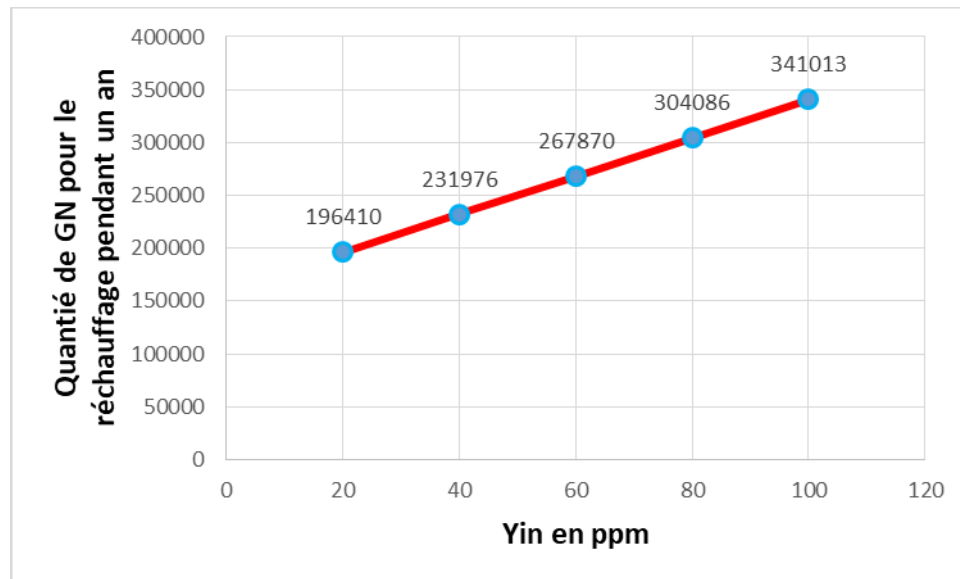


Figure 13: Quantité de GN utilisé pendant un an en fonction de la teneur en eau pour la deuxième solution

Nous remarquons que la quantité de gaz naturel utilisée diminue proportionnellement à la teneur en eau présente dans le GPL.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le stage pratique au sein du complexe GP1/Z nous a permis de découvrir le fonctionnement d'une unité industrielle de déshydratation de GPL. Nous avons pu appliquer nos connaissances théoriques à un cas concret et jouer un rôle actif dans l'analyse et l'optimisation des cycles d'adsorption et de régénération. Cette expérience nous a permis d'acquérir de nouvelles compétences techniques, tout en renforçant mon sens de l'observation et mon autonomie dans notre travail.

À travers ce travail, nous avons étudié en profondeur le fonctionnement de la section de déshydratation de la charge dans le complexe GP1/Z, en mettant l'accent sur l'optimisation des paramètres de fonctionnement, notamment le temps d'adsorption et les conditions de régénération. L'objectif principal était de proposer une méthode qui permette d'améliorer la performance du système sans investissement supplémentaire, tout en garantissant la fiabilité du procédé et la qualité du produit final.

Au sein du complexe GP1/Z, l'objectif principal de la section de déshydratation est de réduire la teneur en eau de l'alimentation, en la faisant passer d'un maximum de 100 ppm à un seuil aussi bas que 1 ppm. C'est dans cette optique qu'il nous a semblé essentiel, durant notre stage, d'étudier ce problème en profondeur, afin d'optimiser les paramètres de fonctionnement de ladite section.

L'étude menée a montré qu'en augmentant le temps d'adsorption de 36 heures (temps de design initial) à environ 188 heures, plusieurs bénéfices sont obtenus. D'abord, cette augmentation réduit le nombre de cycles de régénération nécessaires sur une période donnée, ce qui entraîne une baisse significative de la consommation d'énergie, notamment de gaz naturel utilisé pour le chauffage. Ensuite, le fait de réduire la fréquence des régénérations permet de préserver le tamis moléculaire, en limitant son exposition aux hautes températures, principal facteur de sa dégradation par formation de coke.

L'augmentation du temps d'adsorption s'est révélée être une solution pertinente, car elle permet un gain énergétique notable : la même quantité de gaz naturel consommée actuellement pour un cycle d'adsorption plus court serait utilisée pour un cycle prolongé, entraînant ainsi une meilleure efficacité énergétique.

Au-delà de l'économie en gaz naturel, cette optimisation permet également d'autres bénéfices significatifs :

- Allongement de la durée de vie du tamis moléculaire, le vieillissement de ce dernier étant principalement lié à la formation de dépôts de coke à haute température.
- Une réduction du nombre de régénérations limite son exposition thermique et donc sa dégradation.
- Prolongement de la durée de vie des équipements, grâce à une diminution des contraintes mécaniques (moins de pressurisations et dépressurisations) et thermiques (moins de cycles de réchauffage et de refroidissement).
- Amélioration de la durabilité de la robinetterie, les séquences d'adsorption et de régénération étant pilotées par des ouvertures et fermetures fréquentes de vannes, réduites en cas de cycles plus espacés.

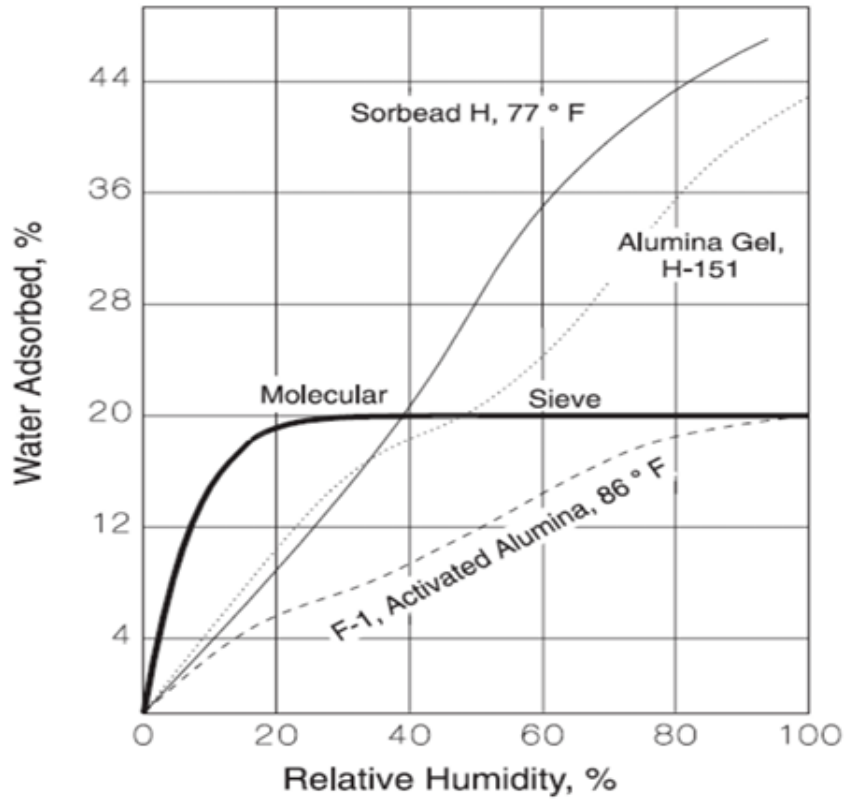
Références
Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. Polycopie I.A.P “ propane liquide déshydratation usine moléculaire Seive”
- [2]. Manuel opératoire ; process : volume 1 et 2. Document GP1-Z
- [3]. Catalogue mécanique ; manuel : volume 1. Document GP1-Z
- [4]. Manuel opératoire ; section déshydratation. Document GP1-Z
- [5]. Formation perfectionnement d'ingénieur.
- [6]. Déshydratation Bloc 11, module 3.
- [7]. Catalogue Mécanique ; process 3 : volume 1. IHI GP-1Z.
- [8]. DATA BOOK; Engineering.
- [9]. DATA BOOK Déshydratation and treating. Section 15,9^{ème} édition, Rev (1974 - 1976).
- [10]. P.Wuithier Raffinage et génie Chimique, Edition tech.paris 1972 TOME 1.
- [11]. Sherwood; propriétés des gaz and liquids.
- [12]. RUTHVEN D. M ; principes of adsorption and adsorption process John Wiley et sons, new York.
- [13]. Grace ; les tamis moléculaire Caractéristiques et Applications Western Germany ; Juin 1980.
- [14]. Revue de I.F.P. Gras pretreatment: w.w Weterman Institut of gas technology Chicago
- [15]. Kohl & Richard - Gas Purification.

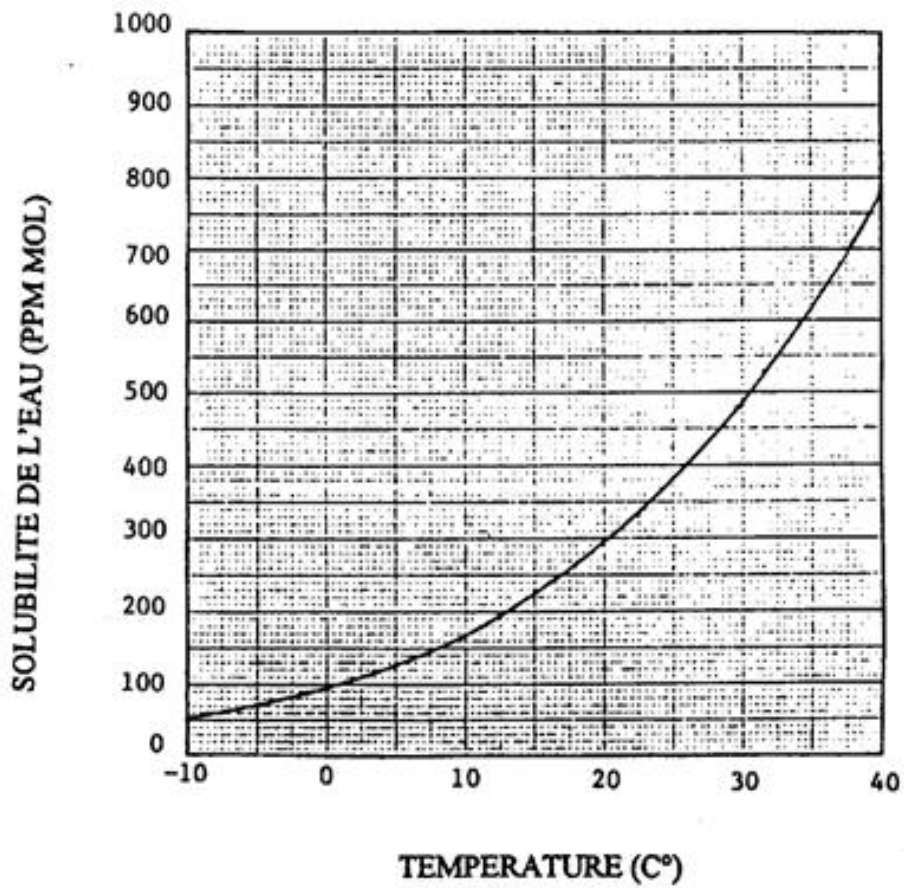
Annexes

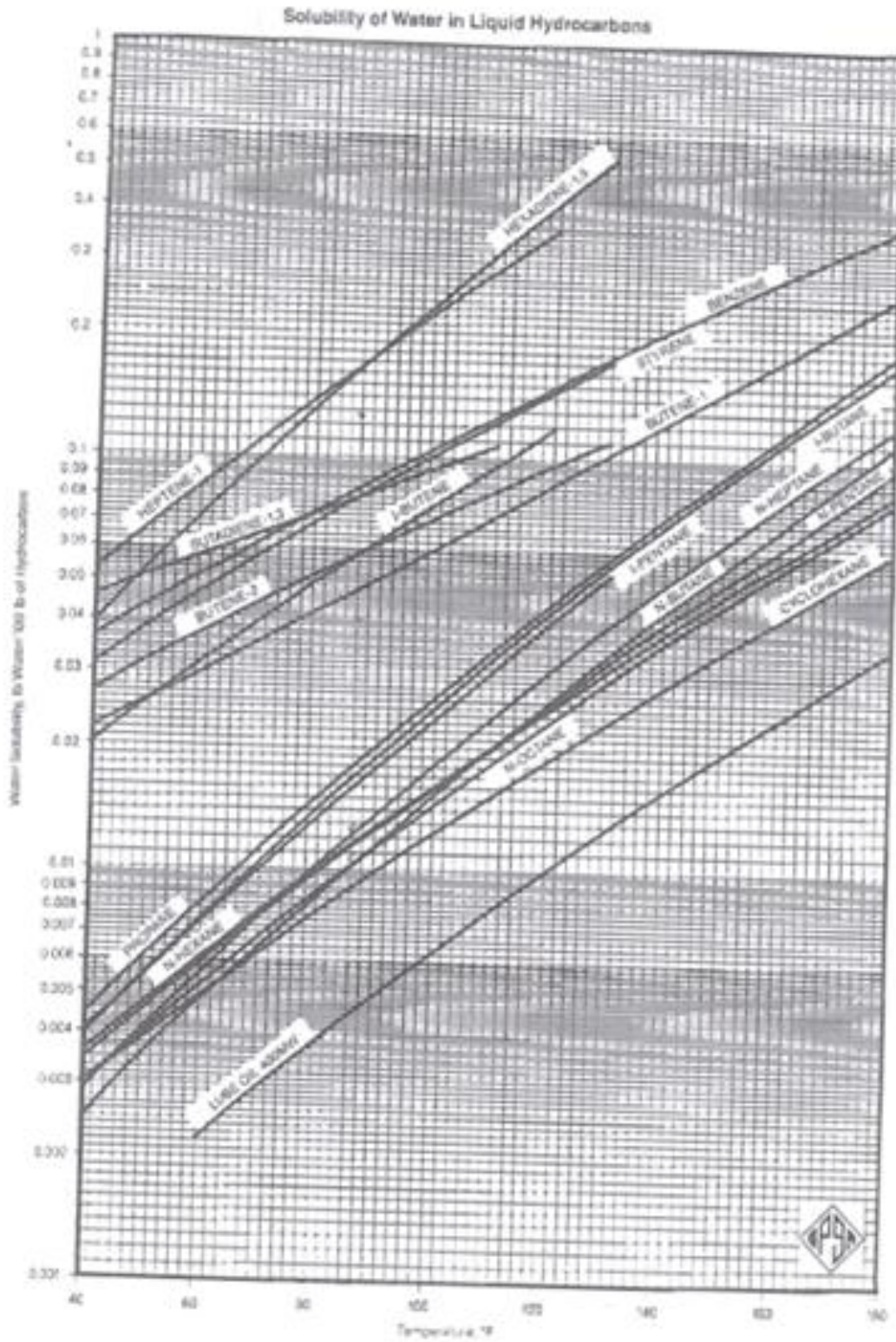
Static Equilibrium Capacity vs. Relative Humidity for Selected Solid Desiccants⁴³



SOLUBILITE DE L'EAU DANS LA CHARGE DE GPL

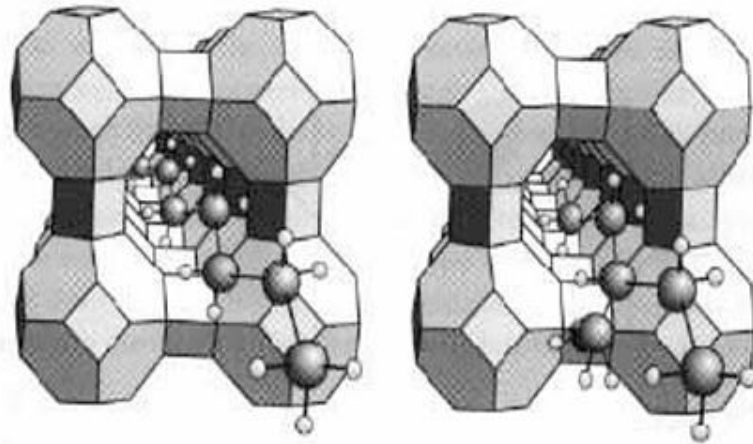
- Note 1. Calcul selon la procédure API
- 2. Source de charge = 13 (moyenne)





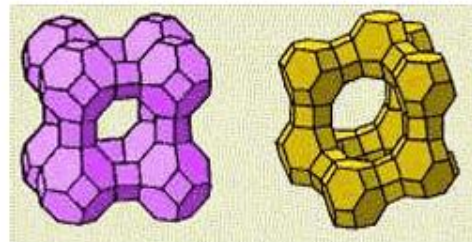
La solubilité de l'eau dans les hydrocarbures liquide

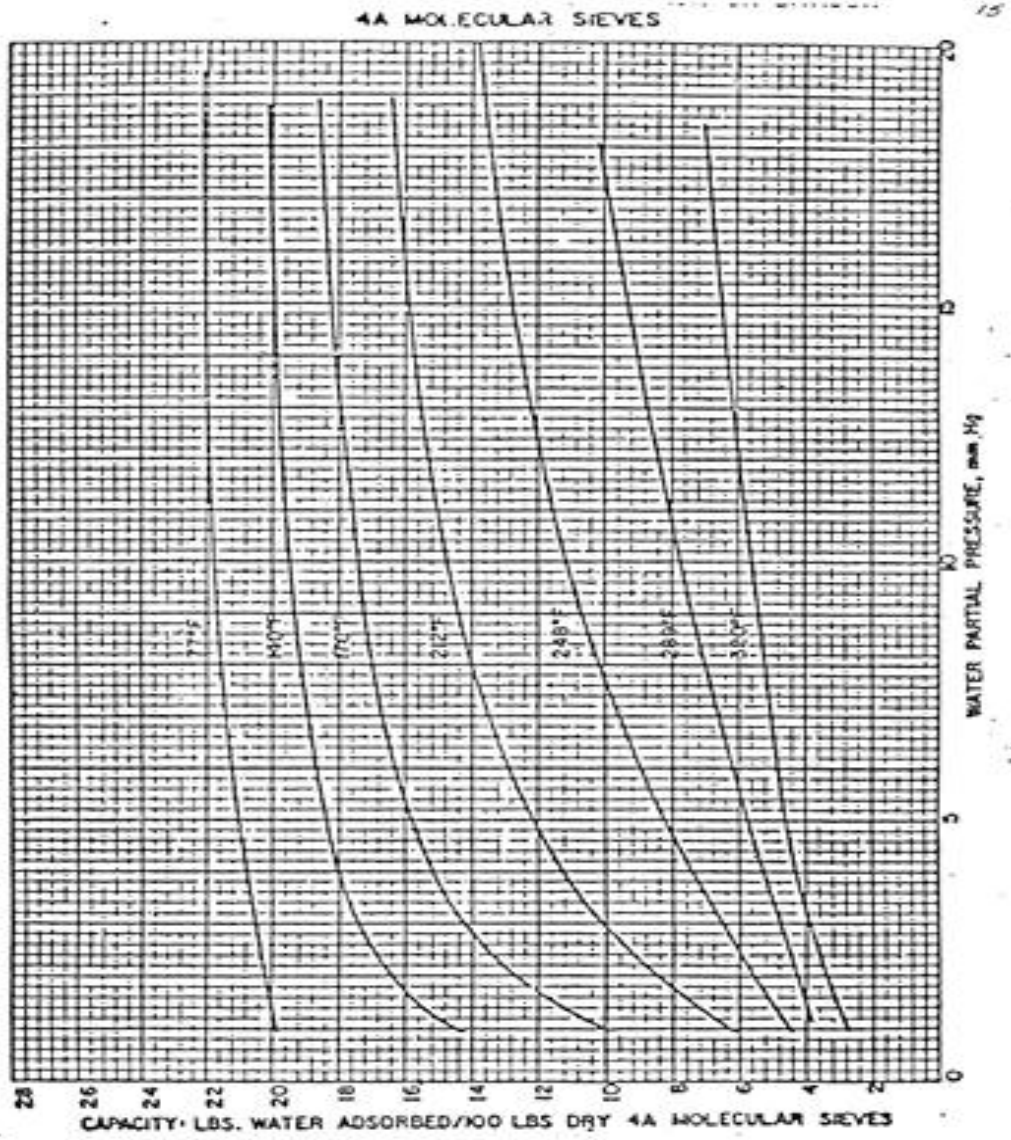
Tamis moléculaires



Structure de zéolithe de type A

Structure de zéolithe de type X





Annexe 6

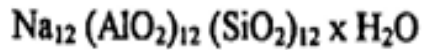
Coefficient de l'équation d'enthalpie H°

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
Non-Hydrocarbures									
1	Oxygène	-2,30774	8,45248	-4,26148	8,65773	-4,67218	1,80774	2,88518	-75 to 1200
2	Hydrogène	26,67487	13,39626	2,48031	-1,88734	2,69187	4,89983	-1,88137	-75 to 1200
3	Eau	-1,72963	1,81387	4,38741	8,47022	-4,49388	1,03913	8,78213	-75 to 1200
4	Sulfure d'hydrogène	-1,47348	8,98883	4,18413	8,15787	-4,17724	8,09844	1,94812	-75 to 1200
5	Azote	-1,72287	1,86648	-1,14286	8,21558	-4,67832	8,86828	1,82548	-75 to 1200
6	Acétylène	-2,30288	2,01017	-4,83881	2,37284	-1,38785	3,76128	8,98487	-75 to 1200
7	Carbone	8,57288	-4,19981	1,35426	8,28714	-4,81132	2,73889	1,87811	-75 to 1200
8	Monoxyde de carbone	-2,26178	1,87481	-4,17284	8,82237	-4,17233	8,38885	2,81848	-75 to 1200
9	Dioxyde de carbone	11,11744	8,47887	8,78238	-4,33792	8,88424	-4,87732	2,74188	-75 to 1200
10	Dioxyde de soufre	3,20138	8,48188	8,24813	8,12888	-4,18878	8,58232	2,88824	-75 to 1200
Paraffines									
11	Méthane	-14,22848	2,38584	-2,28887	5,74828	-3,72785	8,54985	4,33878	-75 to 1200
12	Éthane	-4,84834	1,88892	-4,18812	3,48188	-3,14838	8,88187	1,98888	-75 to 1200
13	Propane	-1,71788	8,72848	8,78714	2,42885	-2,61871	7,88848	2,88848	-75 to 1200
14	n-Butane	17,28134	8,42888	2,82881	8,78883	-1,82871	2,88884	2,74881	-75 to 1200
15	2-Méthylpropane	26,74288	8,18488	2,52148	8,18881	-4,72813	2,88887	3,48818	-75 to 1200
16	n-Pentane	48,28187	-4,81781	3,18488	-1,78218	8,18848	-4,88812	4,87273	-28 to 1200
17	2-Méthylbutane	64,22873	-4,11788	3,41134	-1,31223	8,21481	-4,12889	4,57278	-28 to 1200
18	2,2-Diméthylpropane	27,88418	8,81883	3,88721	-4,72888	-4,88884	2,88848	3,88842	-75 to 1200
19	n-Hexane	-17,18181	8,88228	-8,18173	8,14218	-4,18812	3,88818	-4,28848	-75 to 700
20	2-Méthylpentane	31,78488	8,17883	3,48888	8,84188	-1,88113	3,18884	2,94423	-75 to 700
21	3-Méthylpentane	17,84288	8,38778	1,88878	3,24238	-3,42881	14,88448	2,14854	-75 to 700
22	2,2-Diméthylbutane	48,78881	-4,88823	4,52783	-1,42288	8,71888	-4,88887	5,67113	-28 to 700
23	n-Heptane	-4,13723	8,75488	8,28128	4,98138	-4,48133	14,82888	8,88848	-75 to 700
24	2-Méthylhexane	17,88378	8,48848	1,88848	2,87788	-3,11818	12,54883	1,82428	-75 to 700
25	3-Méthylhexane	36,87288	8,17431	2,82238	1,88787	-1,78138	8,18848	2,84881	-75 to 700
26	2,4-Diméthylpentane	11,38788	8,88833	2,88234	8,88848	1,42887	4,88818	2,42713	-28 to 700
27	n-Octane	2,84723	8,75878	8,28783	4,14233	-4,48198	13,78423	8,72788	-75 to 700
28	2,2-Diméthylhexane	21,41387	8,28873	2,87483	1,48273	-2,14848	7,42888	2,13813	-28 to 700
29	2-Méthylheptane	27,42888	8,38118	1,82883	1,74174	-2,11344	7,78227	2,88844	-75 to 700
30	2,2,4-Triméthylpentane	26,13888	8,88873	2,82234	8,28813	-1,38814	4,88423	2,84888	-75 to 700
31	n-Nonane	4,88228	8,78781	8,48848	3,48542	-4,48138	12,88828	8,22783	-75 to 700
32	n-Décane	-4,98223	8,81373	-4,28841	3,51814	-5,81733	18,88548	4,42448	-75 to 700
33	n-Undécane	48,28884	-4,88827	3,47485	-1,35438	8,24721	-4,14274	3,48788	-28 to 1200
34	n-Dodécane	68,38781	-4,87754	3,42848	-1,38824	8,24728	-4,13888	3,27842	-28 to 1200
35	n-Tridécan	82,78842	-4,88818	3,48883	-1,33238	8,24284	-4,14438	3,24883	-28 to 1200
36	n-Tétradécane	81,88888	-4,88212	3,42192	-1,24518	8,26174	-4,14887	3,17271	-28 to 1200
37	n-Pentadécane	82,21744	-4,18881	3,47273	-1,38812	8,26884	-4,15882	3,18884	-28 to 1200
38	n-Hexadécane	88,27811	-4,88283	3,48113	-1,28887	8,26885	-4,14723	3,88128	-28 to 1200
39	n-Heptadécane	88,82112	-4,88823	3,48888	-1,28227	8,26848	-4,14888	3,87128	-28 to 1200
40	n-Octadécane	88,41881	-4,88878	3,48225	-1,28728	8,27824	-4,15814	3,88272	-28 to 1200
41	n-Nonadécane	88,18818	-4,88272	3,45148	-1,28488	8,28281	-4,14848	2,88882	-28 to 1200
42	n-Eicosane	88,18824	-4,88147	3,48192	-1,28778	8,28283	-4,14883	2,88123	-28 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.

**PROPRIETES PHYSIQUE DE L'ADSORBANT
(TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES)**

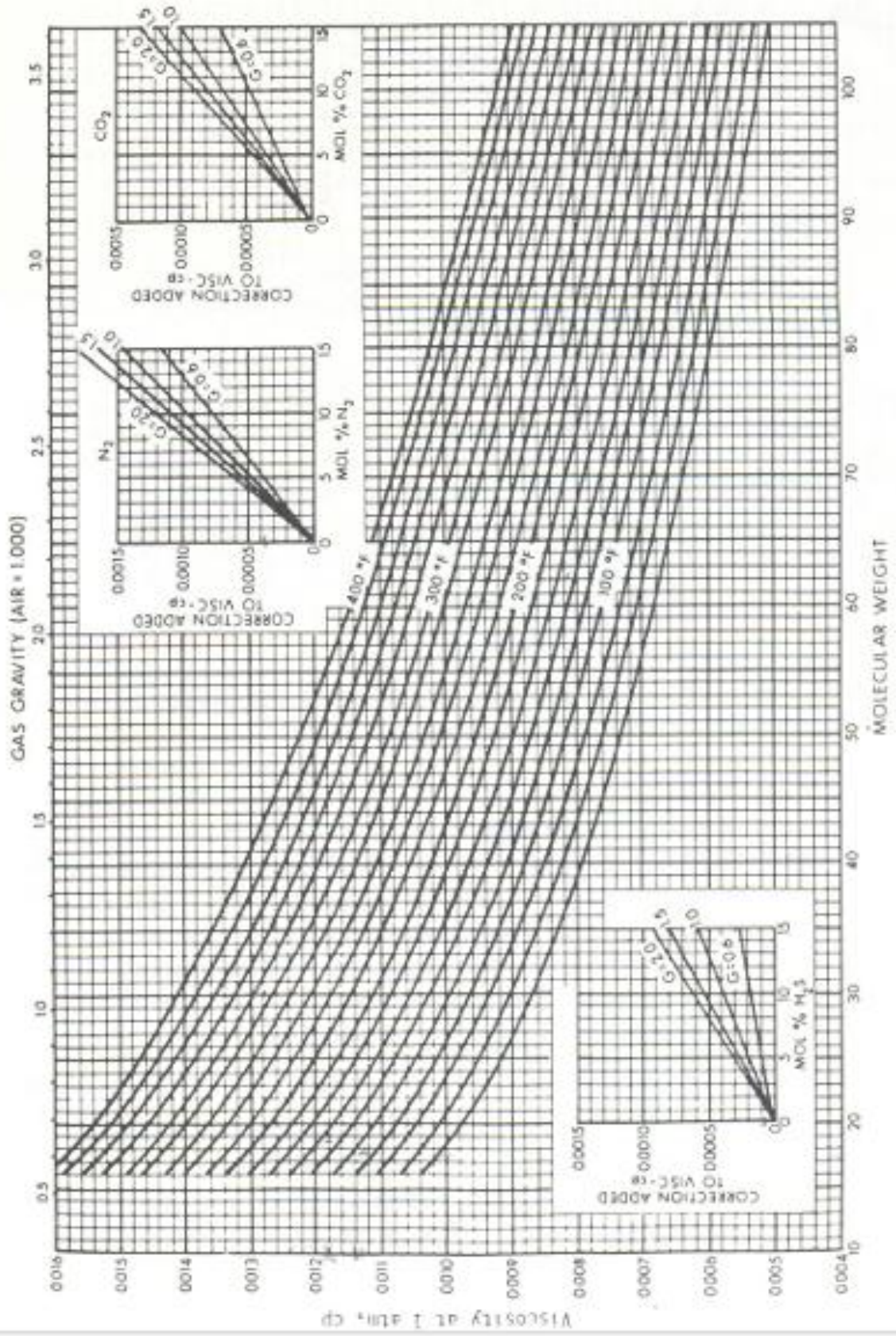
CHEMICAL FORMULAConditions d'expédition

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

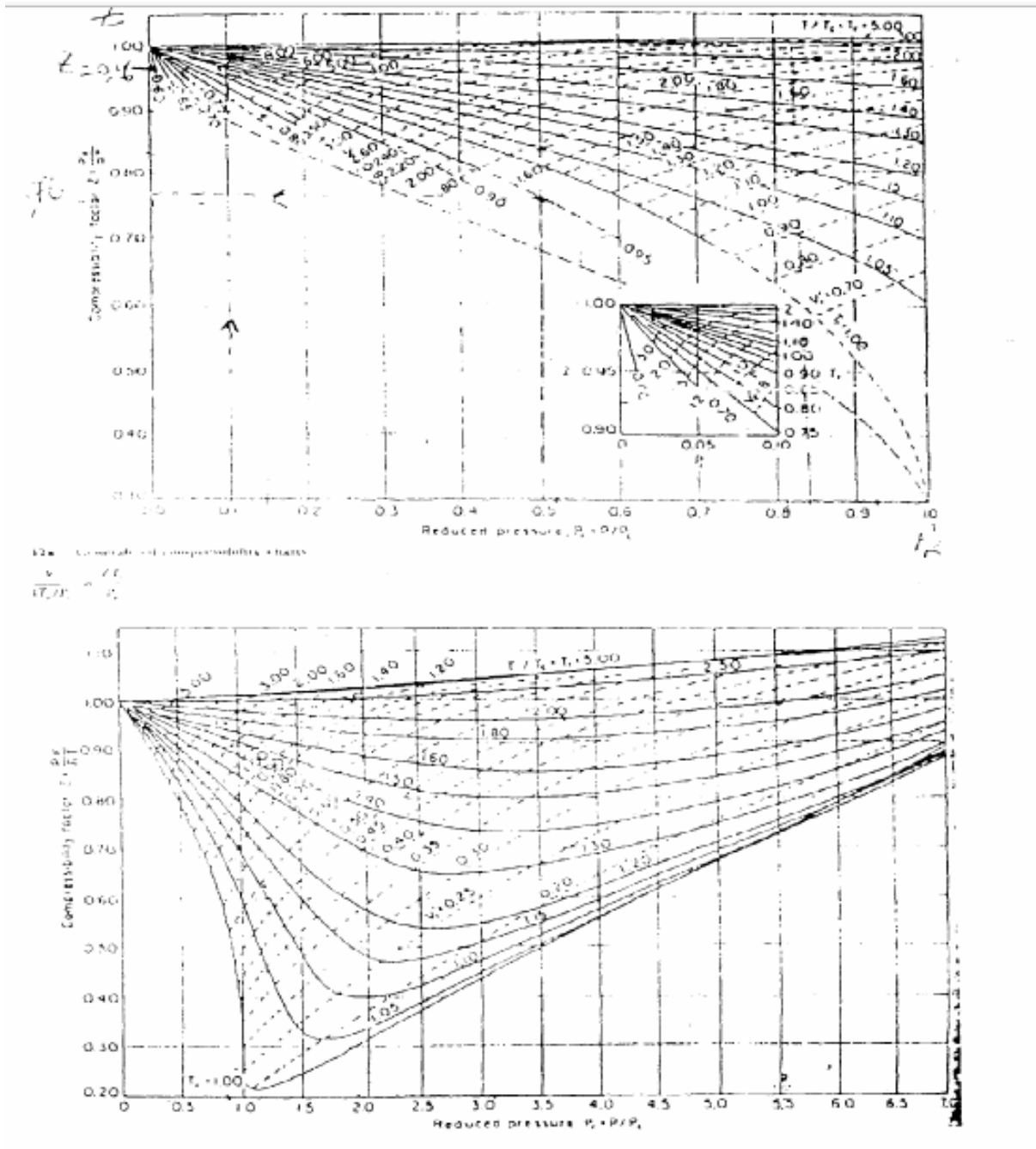
* En Lbs d'eau/100 lbs d'adsorbant activité à 17,5 mm Hg, 25°C.

Annexe 8



Annexe 9

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



Détermination du coefficient de compressibilité Z

Annexe 10

Constantes critiques de pression et de température

NOTE: Numbers in this table do not have accuracy 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	Compound	Formula	A. Molar mass (molecular weight)	B. Boiling point, °F 14.696 psia	C. Vapor pressure, psia 100 °F	D. Freezing point, °F 14.696 psia	E. 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	34.72	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	0.0662	10
11	3-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.177	145.86	6.163	-261.20	1.37090	452.5	448.2	0.0682	11
12	Neohexane	C ₆ H ₁₄	86.177	121.50	9.859	-147.58	1.36283	446.7	419.92	0.0667	12
13	2,3-Dimethylbutane	C ₆ H ₁₄	86.177	136.33	7.466	-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	185.87	3.775	-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	-21.35	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	3.267	-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	-164.71	(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	198.31	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	-157.87	1.3487*	545.9	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	0.0671	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	582.15	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	691.22	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	612.9	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 ₁₀	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*	1069.5	87.73	0.0342	53
54	Hydrogen sulfide	H ₂ S	34.082	-76.49	394.67	-121.86*	1.00057*	1309.	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*	0.05101*	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	211.963*	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*	1265.	124.75	0.0356	64

9/15/95

Annexe 11

