



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie chimique

THÈME

Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section
déshydratation de charge du complexe GP/Z.

Présenté par

- 1- MOSTEFAOUI Fatima Zahra.
- 2- YEKRELEF Sara .

Soutenu le 15/06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	BOUBAGRA Naima	M.C.A	Université de Mostaganem
Examineur :	SEFIR Yamina	M.C.A	Université de Mostaganem
Rapporteur :	TERKHI S	Pr	Université de Mostaganem

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la force de mener à bien ce travail.

Nous adressons également nos remerciements à notre directrice de thèse, **Pr S.TERKHI** pour les conseils qu'elle nous a prodigués tout au long de la préparation de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements aux membres du jury, **Mme SEFIR YAMINA** et **Mme BOUBAGRA NAIMA**, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

nous remercions vivement le personnel du département de production qui nous a accueillis au complexe GP1/Z pour son accueil, ses encouragements et son aide.

Nous adressons également nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail.

DEDICAS

Tout d'abord, je remercie Dieu tout-puissant de m'avoir accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce mémoire.

Je voudrais remercier l'homme de ma vie, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir. Que Dieu te garde et te protège, mon cher papa **ABDELKADER**.

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie, mon bonheur : **MAMAN**, que j'adore.

À mes frères **ZAKARIA** et **MOHAMED**, les mots ne suffisent pas pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je vous porte. Je vous dédie ce travail, avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de longue vie.

À ma binôme Sara et à mes chers amis **SAYAH CHAIMA** et **MEDJAHED ASMA**, je ne trouve pas les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées.

FATIMA ZAHRA.

DEDICAS

À mes chers parents, c'est avec les sentiments les plus sincères et une grande joie que je dédie cette lettre à mon cher père, **Yekhlef**, et à **ma chère mère**, en signe de ma profonde gratitude et de ma reconnaissance infinie pour la confiance et le soutien qu'ils m'ont accordés.

Rien au monde ne saurait égaler les efforts qu'ils ont déployés pour mon éducation et mon bien-être.

À mon frère **Mohamed**, à sa femme **Abir** et à mes chères sœurs **Samia**, **Amina**, **Fatima** et **Asma**, je vous adresse mes vœux les plus sincères pour une vie pleine de succès, de joie et de bonheur. Que Dieu vous accompagne et vous accorde une vie pleine de réussite et de sérénité

À mes chères amies, **MEDJAHED ASMA** et **ZERRIFI RACHA**. En gage de l'amitié qui nous lie et en souvenir de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail avec tout mon affection et ma reconnaissance.

À ma chère amie et à mon binôme, **MOSTEFAOUI Fatima Zahra**, qui a partagé avec moi les efforts, les défis et les beaux moments tout au long de ce parcours, je souhaite exprimer ma profonde gratitude.

Je te remercie pour ton soutien, ta patience et ta précieuse collaboration.

Travailler à tes côtés a été une expérience formidable dont je me souviendrai toujours.

Je te souhaite tout le succès et tout le bonheur possibles pour la suite.

SARA.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تحسين أداء وحدة تجفيف الغاز البترول المسال 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 سلباً على أداء النظام . و أظهرت النتائج أن زيادة وقت الامتصاص من 36 ساعة إلى حوالي 163 ساعة تؤدي إلى تقليل عدد دورات التجديد , مما يحقق مكاسب مهمة من حيث الطاقة و التكلفة كما ساهم هذا التحسين في إطالة العمر التشغيلي للمناخل الجزيئية و تحسين الكفاءة الطاقوية للوحدة دون التأثير على فعالية عملية التجفيف .

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

Abstract:

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 showed that increasing the absorption time from 36 hours to approximately 163 hours reduces the number of regeneration cycles, resulting in significant energy and cost savings. This optimization also contributed to extending the operational lifespan of the molecular sieves and affecting the effectiveness of the dehydration process.

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

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 montré que l'augmentation du temps d'absorption de 36 heures à environ 163 heures permet de réduire le nombre de cycles de régénération, générant ainsi des gains importants en termes d'énergie et de coûts. Cette optimisation a également contribué à prolonger la durée de vie des tamis moléculaires et améliorer l'efficacité énergétique de l'unité, sans affecter les performances du procédé de déshydratation.

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

Sommaire

Résumé	I
Listes des figures	III
Listes des tableaux	II
Nomenclature	V
Introduction générale.....	1
Chapitre I . Description générale du complexe.	
I.1. Introduction	2
I.2. Description du complexe	2
I.3. Principales installation	2
I.4. Capacité	3
I.5. Alimentation de l'usine	3
I.6. Les utilités	4
I.7. Procédé de fabrication	4
I.7.1. Zone de stockage de GPL.....	4
I.7.2. Zone de fabrication.....	5
I.7.2.1. Section déshydratation.....	7
I.7.2.2. Section de séparation.....	7
I.7.2.3. Section de réfrigération.....	9
I.7.2.4. Section d'huile chaude.....	10
I.7.3. Zone de stockage et expédition.....	11
I.7.3.1. Stockage à température ambiante.....	11
I.7.3.2. Stockage a basses température.....	11
I.7.3.3. Section de récupération des Gaz Évaporés.....	11
I.7.3.4. Section de chargement.....	12
I.8. Généralité sur le GPL.....	13
I.8.1.Dédinition du GPL.....	13
I.8.2. L'origine des GPL.....	13
I.8.3. Caractéristiques générales du GPL.....	14
I.8.4. L'utilisation du GPL.....	15
I.8.5. Les risques du GPL.....	16
Chapitre II. Systèmes de déshydratation de charge dans le complexe GP1Z.	
Introduction	17
II.1.Les modes de déshydratation et tamis moléculaires.....	18
II.1.1. Les mode de déshydratation.....	18
II.1.1.1. Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates....	18
II.1.1.2. Déshydratation par absorption dans un liquide.....	19
II.1.1.3. Déshydratation par absorption sur un desséchant solide.....	20

II.1.2. Les tamis moléculaires.....	25
II.1.2.1. Définition des tamis moléculaire	25
II.1.2.2. Composition des tamis moléculaire	25
II.1.2.3. Phénomène d'adsorption d'un tamis moléculaire.....	28
II.1.2.4. Les hydrate	30
II.2. Généralités sur la section de déshydratation.....	32
II.2.1. Le cycle de régénération.....	32
II.2.1.1. Drainage.....	32
II.2.1.2. Dépressurisation.....	33
II.2.1.3. Chauffage.....	34
II.2.1.4. Refroidissement.....	36
II.2.1.5. Remise sous pression.....	36
II.2.1.6. Remplissage en liquide.....	37
Chapitre III. Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge.	
III.1. Introduction.....	39
III.2. Problématique	39
III.3. Constitution d'un déshydrater de charge.....	40
III.4. La méthode de calcul des paramètres de fonctionnement.....	41
III.4.A. Bilan Énergétique	44
III.4.B. Bilan de matière de la régénération.....	46
III.5. Fiabilité de la méthode.....	47
III.5.1. Calcul de la quantité d'eau adsorbée.....	48
III.5.A. Calcul du bilan énergétique.....	51
III.5.B. Calcul du bilan de matière de régénération.....	55
III.5.2. Récapitulation des résultats.....	57
III.6. Étude des solutions.....	58
III.6.1. Étude de la prolongation de la durée d'adsorption (Étude de la première solution)	58
III.6.2. Étude de la réduction de la durée de régénération (Étude de la deuxième solution)	63
III.7. Interprétation et Choix de la Solution optimale	66
Conclusion générale	67
Bibliographies	VI
ANNEXE .	

Liste des figures

- Figure I.1.** Lignes d'alimentation.
- Figure I.2.** Schéma du procédé GPL.
- Figure I.3.** Fractionnateur .
- Figure I.4.** Déethaniseur.
- Figure I.5.** Dépentaniseur .
- Figure I.6.** Section de réfrigération .
- Figure I.7.** Section d'Huile chaude.
- Figure I.8.** Schéma du procédé de liquéfaction du GPL.
- Figure I.9.** Récupération des GPL à partir du pétrole Brute.
- Figure I.10.** Récupération du GPL à partir des champs de GN.
- Figure II.1.** La déshydratation par injection de glycol.
- Figure II.2.** La Déshydratation par absorption au T.E.G.
- Figure II.3.** La déshydratation par adsorption sur un dessicant solid .
- Figure II.4.** La zone ZMT se déplace lors de l'adsorption.
- Figure II.5.** La courbe de percée.
- Figure II.6.** Différentes formes des tamis moléculaire.
- Figure II.7.** Évolution de la concentration de l'adsorbat (fluide) au cours de l'adsorption.
- Figure II.8.** Hydrate solide.
- Figure II.9.** Structures des hydrates.
- Figure II .10.** Séquence de drainage.
- Figure II.11.** Séquence de dépressurisation.
- Figure II.12.** Séquence de chauffage.
- Figure II.13.** Séquence de chauffage.
- Figure II .14.** Refroidissement.
- Figure II.15.** Preurisation.
- Figure II.16.** Remplissage.
- Figure II.17.** Schéma de la section déshydratation.
- Figure III.1.** La variation de la teneur en eau dans la charge durant le mois de Novembre 2025.
- Figure III.2.** Organigramme de calcul général de la prolongation de la durée d'adsorption.
- Figure III.3.** Organigramme de calcule générale de la réduction de la durée de régénération.

Liste des tableaux

Tableau I.1. La comparaison du pouvoir calorifique des composants du GPL.

Tableau II.1. Diamètres critiques de certaines molécules.

Tableau II.2. Vitesse et diamètre du lit.

Tableau II.3. Les étapes de cycle de régénération.

Tableau III.1. La fiche technique du tamis moléculaire .

Tableau III.2. Les conditions opératoires d'adsorption/désor .

Tableau III.3. Composition de la charge du GPL .

Tableau III.4. La composition du gaz de régénération.

Tableau III.5. Les propriétés du gaz de régénération.

Tableau III.6. Représentation des résultats cas design et cas de calcul actuel .

Tableau III.7. Représentation des résultats obtenus de deux solutions proposées.

Nomenclature

GPL : gaz de pétrole liquéfié.

ρ_{GPL} : masse volumique de la charge GPL.

ρ_{tamis} : masse volumique de tamis moléculaire (lb/ft³).

Y_{in} : teneur en eau dissoute dans la charge .

ppm : partie par million.

C_p : Chaleur spécifique (kcal/kg. °C).

D : Diamètre du lit (ft).

G : Vitesse massique admissible (lb/hft²).

Q_w : Débit d'eau (lb/ft² .hr).

H_s : La longueur de la zone d'équilibre saturée (ft).

H_t : Hauteur total de lit (ft).

H_z : La longueur de ZTM (ft).

H_P : Haute pression.

B_P : Basse pression.

M_w : Poids moléculaire (kg).

P : Pression de gaz en (psi).

Q : Débit de traitement du gaz (ft/jour).

q : quantité d'eau adsorbée par unité de temps et unité de surface en (lb H₂O/ft² .h).

t_{ads} : temps d'adsorption.

M_{ads} : masse d'eau adsorbée.

EFF : efficacité d'adsorption.

H : Enthalpie de la chaleur nécessaire.

T : Température de gaz.

H_f : chaleur fournie par le four.

$H_{f/\text{cycle}}$: la quantité de la chaleur fournie par cycle.

U_{act} : Vitesse actuelle d'écoulement du fluide en (ft/hr).

X : Capacité d'adsorption.

Z : Facteur de compressibilité.

Re : nombre de Reynolds.

μ : viscosité.

ZMT : la zone de transfert de masse (ft).

ρ : masse volumique du gaz (lb/ft³).

Introduction générale.

Le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) s'impose aujourd'hui comme une source d'énergie importante dans le paysage énergétique mondial, grâce à ses avantages économiques et à son faible impact environnemental par rapport aux combustibles classiques. Il constitue également une matière première essentielle pour plusieurs industries. Actuellement, le GPL connaît une forte croissance dans le marché mondial, ce qui renforce l'importance des complexes de traitement tels que le GP1/Z, où différentes opérations sont mises en œuvre afin d'assurer la séparation et la valorisation des hydrocarbures.

Cependant, le bon fonctionnement de ces unités ne dépend pas uniquement des opérations de fractionnement, mais également d'étapes de traitement indispensables, notamment la déshydratation du gaz. Au sein du complexe GP1/Z, cette opération est assurée par une section dédiée, dont le rôle est d'éliminer l'eau contenue dans le gaz, permettant ainsi de réduire sa teneur d'environ 100 ppm à 5 ppm, afin de limiter la formation d'hydrates, la corrosion des équipements et les perturbations du procédé.

Dans ce contexte, l'optimisation du fonctionnement de la section de déshydratation représente un enjeu majeur pour améliorer les performances globales du complexe et garantir une exploitation fiable et sécurisée.

Ce travail a pour objectif d'analyser le fonctionnement de cette section, d'identifier les paramètres influençant son efficacité et de proposer des solutions techniques permettant d'optimiser ses performances

Ce mémoire est structuré comme suit :

I. Le premier chapitre de cette mémoire présente la description complexe GP1/Z et met en lumière ses objectifs ainsi que ses activités.

II. Le deuxième chapitre est consacré aux procédés de déshydratation du GPL en mettant l'accent sur le fonctionnement des unités d'adsorption à tamis moléculaires ainsi que sur leur cycle de régénération

III. Le troisième chapitre est dédié à la présentation de la problématique et des méthodes de calcul des paramètres de fonctionnement basé sur deux solutions proposées afin d'utiliser dans la section de déshydratation de charge.

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

Chapitre I.

Description général du complexe.

I.1. Introduction [1]

Sonatrach dispose d'importantes infrastructures dédiées à la production, au transport et au traitement des hydrocarbures, notamment le gaz naturel et le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL). Ces installations jouent un rôle essentiel dans la valorisation des ressources énergétiques et dans leur commercialisation, aussi bien sur le marché national qu'international.

Parmi ces infrastructures stratégiques figure le complexe GP1/Z, spécialisé dans le traitement et la séparation du GPL à partir du gaz naturel. Ce chapitre a pour objectif de présenter ce complexe, son fonctionnement ainsi que son rôle dans le processus de production et d'expédition vers les marchés national et international.

I.2. Description du complexe [1]

Le complexe de Production GPL dénommé GP1/Z ou " JUMBO GPL " de l'Entreprise nationale **SONATRACH** est le dernier des Ensembles Industriels de la zone d'Arzew.

Le " JUMBO GPL " s'étend sur une surface de 120 hectares sur la bande terre comprise entre la route 11 et le bord de la mer méditerranéenne

Le Complexe a été construit dans le cadre d'un contrat clé en main avec le concours d'un consortium Japonais IH1-CITON, et 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 du complexe Hassi Messaoud, Hassi R'Mel , Ain Amenas etc.

La Capacité annuelle de production de l'usine est de 10,8 millions de Tonne par an. Par sa situation géographique proche du marché et par ses capacités de production, le GP1/Z fait occuper une place de choix à la SONATRACH dans le marché International des GPL.

I.3. Principales installations [2]

Le complexe repose sur un ensemble d'installations industrielles stratégiques assurant le traitement :

- ❖ 22 sphères de stockage de la charge d'alimentation de 1000 m³ chacune ,
- ❖ 09 trains de traitement du GPL ,
- ❖ 03 unités de liquéfactions du gaz évaporé ,
- ❖ 04 bacs de stockage de propane basse température de 70000 m³ chacune ,

- ❖ 04 bacs de stockage de butane basse température de 70000 m³ chacune ,
- ❖ 04 sphères de stockage de production à température ambiante (propane et butane) de 500 m³ chacune,
- ❖ 01 sphère de stockage gazoline,
- ❖ 05 salles de contrôle,
- ❖ 02 stations électriques alimentent par le SONELGAZ,
- ❖ 06 générateurs l'énergie de secours du complexe en cas de coupure de courant,
- ❖ 02 Quais de chargement pouvant recevoir des navires d'une capacité variante entre 4000 et 5000 tonnes,
- ❖ Une rampe de chargement de camions,
- ❖ Une station de pompage d'eau de mer pour le réseau d'incendie,
- ❖ Un système de télésurveillance.

I.4. Capacité [2]

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

I.5. Alimentation de l'usine [1]

➤ Les source d'alimentation :

L'usine reçoit son alimentation de GPL des sources suivantes : Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Adrar, In amenas,etc.



Figure I.1. Lignes d'alimentation

I.6. Les utilités [1]

Elle alimente les diverses zones de production en :

- ❖ Fuel (gaz naturel) : utilisé comme combustible,
- ❖ Air : elle est divisée en deux,
 - ✓ Air instrument : c'est de l'air séché après enlèvement de l'humidité , cet air aide pour ouvrir les vannes et la manipulation des boucles de régulation (vanne pneumatique).
 - ✓ Air service : c'est l'air qui sert pour le nettoyage et l'entretien
- ❖ Vapeur : l'eau distillée Vien de KAHRAMA et à partir de la chaudière on production de la vapeur.
- ❖ Eau
 - ✓ L'eau distillée.
 - ✓ L'eau de refroidissement.
 - ✓ L'eau potable.
- ❖ Méthanol : il est utilisé pour le dégivrage .
- ❖ Gasoil : il est utilisé pour les générateurs de secours .
- ❖ Azote : ballon d'azote , il y'a deux circuits.
 - ✓ Circuit Gazeuse (HELIOS).
 - ✓ Circuit l'azote liquide (COGIZ) : on le transforme en vapeur pour l'inertage des équipements .
- ❖ Les torches : trois hautes pressions et deux basses pressions servent à bruler la quantité de gaz provoquée par un dysfonctionnement des trains.

I.7. Procédé de fabrication :[2]

Le procédés de fabrication dans GP1/Z passe par 3 zones :

- Zone 1 : stockage de GPL.
- Zone 2 : fabrication.
- Zone 3 : stockage et expédition.

➤ I.7.1. Zone de stockage de GPL

Cette section est conçue pour maintenir un fonctionnement stable et d'assurer une autonomie de plus de 10 heures pour alimenter les trains en GPL brut en cas d'arrêt de

pompage. Elle est destinée aussi pour recevoir soit le flux de recyclage, soit le produit hors spécification revenant des sections en aval.

La charge d'alimentation est livrée par Région Transport Ouest (RTO) au complexe GP1/Z le GPL brut en provenance des différents champs du sud (Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Adrar, In Amenas, Tin-Fouye, Tabankort et Rhourde Nous).

Cette charge est acheminée vers le stockage à l'aide d'une pipe de 24 m. Avant stockage, le GPL brut passe d'abord par un collecteur équipé par un contrôleur de pression permettant le maintien d'une pression de service stable puis traverse des filtres chacun muni PDI ($\Delta P=0,5$) afin de signaler l'encrassement.

Ensuite le GPL traverse les dégazeurs de la charge afin de séparer et purger les vapeurs du mélange vers les sphères d'alimentation.

Une fois que la charge est filtrée et dégazée, elle passe alors à travers six (06)

démérisseurs pour réduire sa teneur en Mercure jusqu'à l'ordre de 5 nano-g/Nm³.

À l'issue des démercuriseurs la charge passe par des redresseurs pour rendre l'écoulement laminaire afin d'avoir une lecture correcte du débit et de la densité du GPL. Le GPL brut est acheminé ensuite vers les sphères de charge sous une pression de 18 ~ 22 Kg/cm² et une température de 5 ~ 41.8 °C

La charge est stockée dans 22 réservoirs sphériques de capacité de 1000 m³ chacune à des pressions variables entre 7 et 9 bars.

Le GPL brut est acheminé par la suite vers les neuf trains du procédé qui fonctionnent en parallèle. Cette opération est assurée par 14 pompes centrifuges multi étages à puisard qui aspirent à partir de ce dernier et refoulent dans le collecteur commun pour approvisionner les trains du procédé à une pression de 30 Kg/cm²

➤ **I.7.2. Zone de fabrication**

En cette zone le GPL brut est acheminé vers les 9 trains identiques installés en parallèle. Chaque train est conçu de manière à produire 1.200.000 de tonnes/an . LA comprend les sections suivantes :

- Déshydratation
- Séparation (Fractionnateur, Dééthaniseur, Dépentaniseur)

- Réfrigération
- D'huile chaude

Le procédé général du GPL est résumé dans la figure I.2

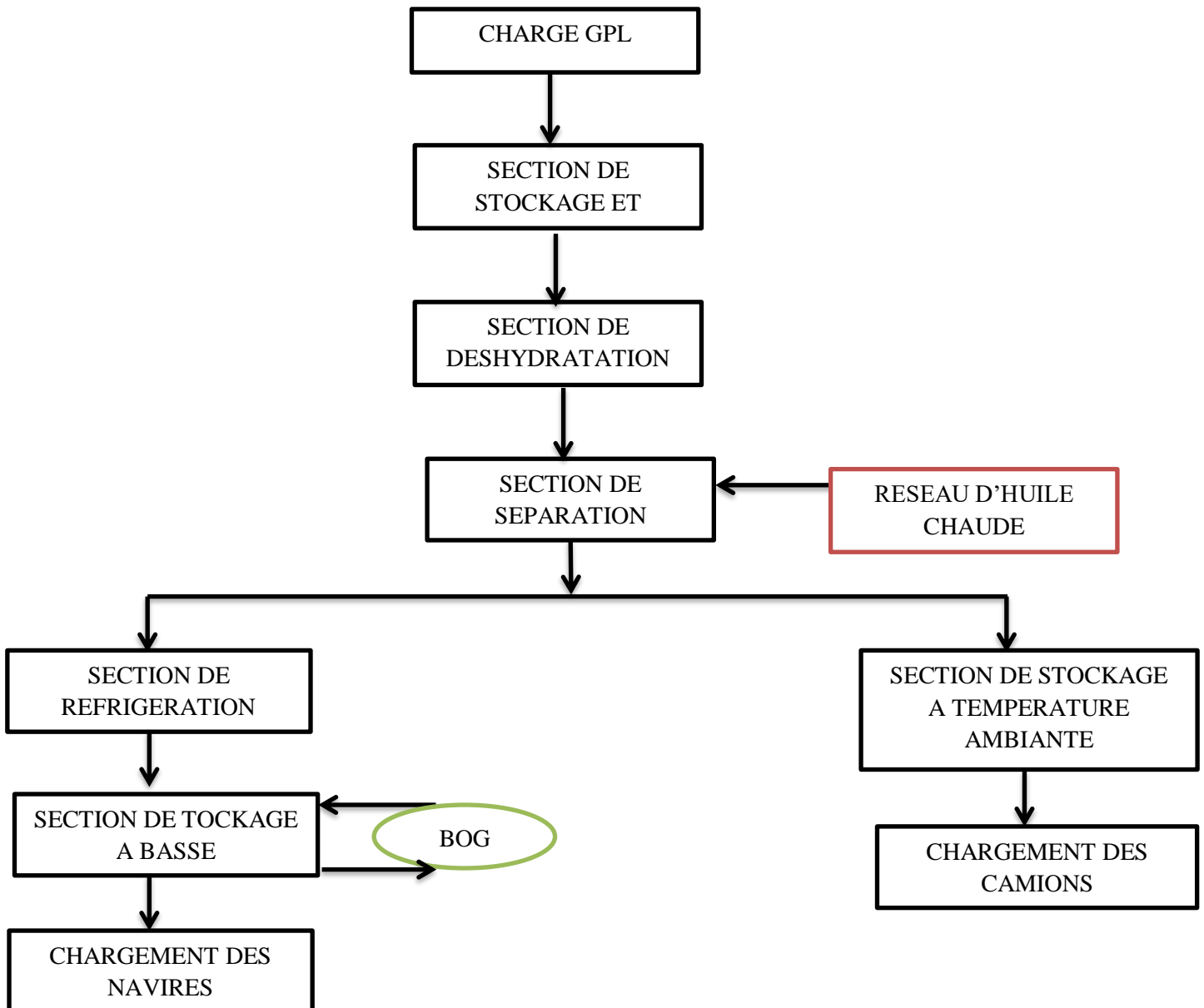


Figure I.2. Schéma du procédé GPL

I.7.2.1. section déshydratation [2]

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

I.7.2.2. Section de séparation de GPL[1]

L'objectif de cette section est de fractionner le GPL brut en produits commerciaux (propane (C3) et butane (C4), y compris éventuellement C5), en respectant un taux de récupération

T_r maximal.

La composition du GPL brut est le facteur principal qui guide le fonctionnement global de la section de séparation. Tout d'abord, la charge traverse le fractionnateur qui distingue le produit léger (propane et éthane) du produit lourd (butane et pentane).

a) Le Fractionnateur [1]

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

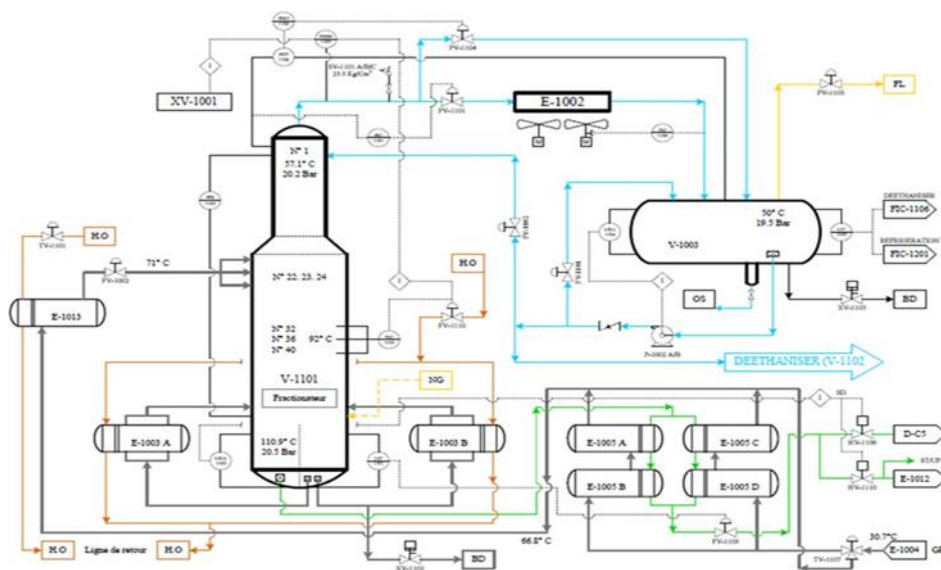


Figure 1

Figure I.3. Fractionnateur

b) Le dééthaniseur [1]

Afin de produire du propane commercial plus au moins pur, les produits de tête de la colonne de fractionnement alimentent le dééthaniseur (figure I.4).

Ce dernier est une colonne de fractionnement équipée de 25 plateaux à clapets. Le propane sort au fond de la colonne à une température de 62 °C se dirige directement vers le premier préchauffeur du fractionnateur, passe ensuite vers les aéros réfrigérants E-1011 où il va être refroidit avant de pénétrer dans la section de réfrigération, où il est refroidi à -38°C, enfin vers les sphères de stockage afin d'être expédiés sur le marché national.

Le gaz riche en éthane sortant de la partie supérieure du dééthaniseur est utilisé comme combustible du four.

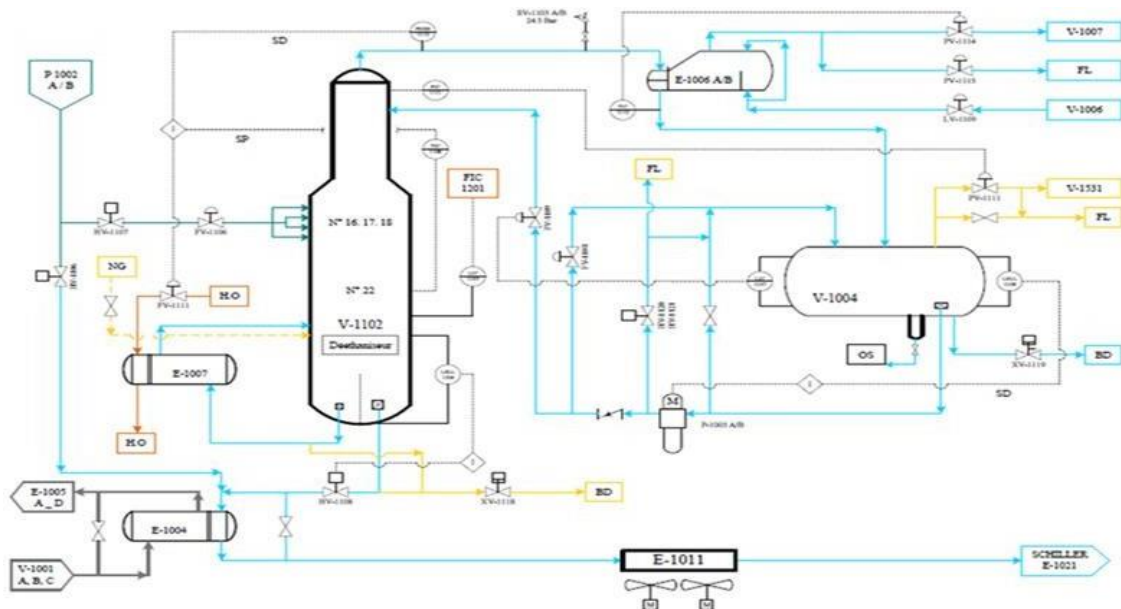


Figure I.4. Dééthaniseur

c) Le dépentaniseur : [1], [3]

Il existe deux dépentaniseurs communs pour les 09 trains.

Le rôle d'un dépentaniseur est d'éliminer les traces de pentane contenues dans le butane. La colonne est constituée de 50 plateaux à clapets (figure I.5).

Le butane sortant de la tête du dépentaniseur, mélangé au reste du butane non dépentanisé est envoyé à la section de réfrigération. Le pentane recueilli du fond du Dépentaniseur sera

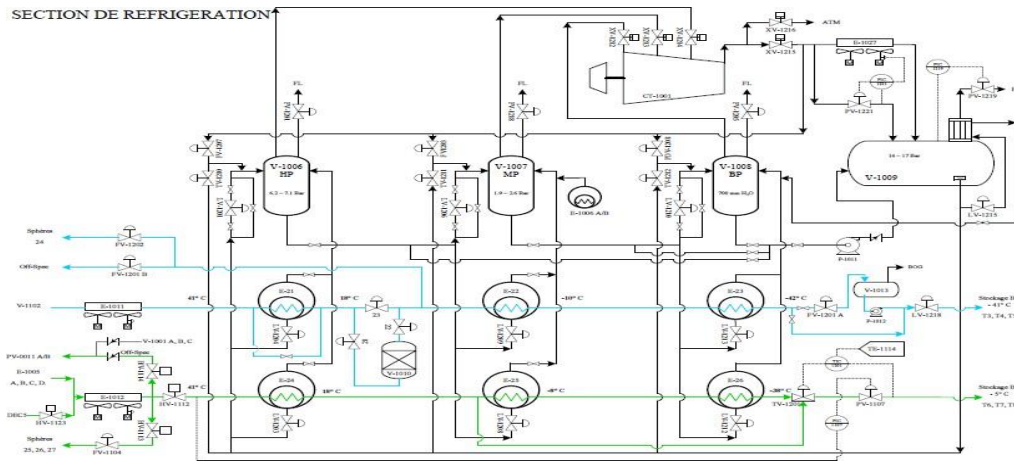


Figure I.6. Section de réfrigération

I.7.2.4. Section d'huile Chaude [1]

Cette section d'huile (TORADA-TC) est utilisée comme source de chaleur pour les équipements suivants :

- Le troisième préchauffe (E-1013)
- Les rebouilleurs de la section séparation : E-1013A/B, E-1007, E-1009
- Le gaz naturel de régénération de la section déshydratation.

Le circuit de l'huile est aussi une boucle fermée, les pompes en circulation aspirent l'huile du ballon d'expansion et le refoulent vers le four. Au niveau du four l'huile est chauffée premièrement par convection puis radiation jusqu'à 180°C ensuite elle est dirigée vers les différents utilisateurs, à son retour l'huile est refroidie à 130°C (figure I.7).

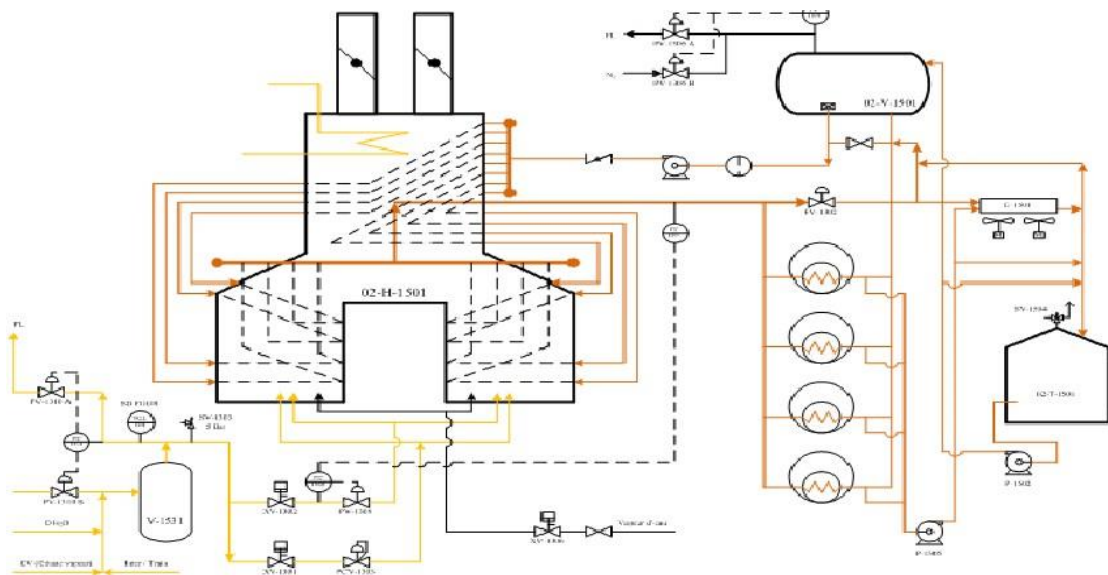


Figure I.7. Section d'huile chaude

I.7.3. Zone de stockage et expédition [1]

Elle s'occupe de stockage des produits finis et l'expédition par navires et camions. On distingue les types de stockage suivant :

I.7.3.1. Stockage à température ambiante (marché nationale)

Le stockage est Prévu pour la commercialisation du gaz à l'échelle nationale, le chargement camions se fait à partir des 4 sphères ayant une capacité de 500 m³ chacune dans lesquelles sont stockés le propane et le butane sous pression.

I.7.3.2. Stockage à basses températures (marché internationale)

Les gaz réfrigérés (propane et butane) sont véhiculés aux bacs où ils seront stockés dans les conditions de basse température sachant que la capacité de chacun est 70.000 m³ et sont munis de pompes immergées pour la circulation du gaz et le chargement navires.

I.7.3.3. Section de Récupération des Gaz Evaporés (Boil of Gas)

La section de liquéfaction des vapeurs (BOG), a pour but le contrôle de la pression dans les réservoirs de stockage à basse température, aussi bien pendant le stockage que pendant les opérations de chargement, les vapeurs excédentaires récupérées sont comprimées pour qu'elle

puissent être liquéfiées sous forme de condensats réfrigérés aux réservoirs à basse température, le contrôle est assuré par deux salles :

- **LCR (Local Control Room)** : s'occupe de la gestion des opérations de stockage des produits finis, section récupération BOG (gaz évaporé).
- **JCR (Jetty Control Room)** : s'occupe de la supervision des opérations de chargement par navire.

I.7.3.4. Section de chargement [1]

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.

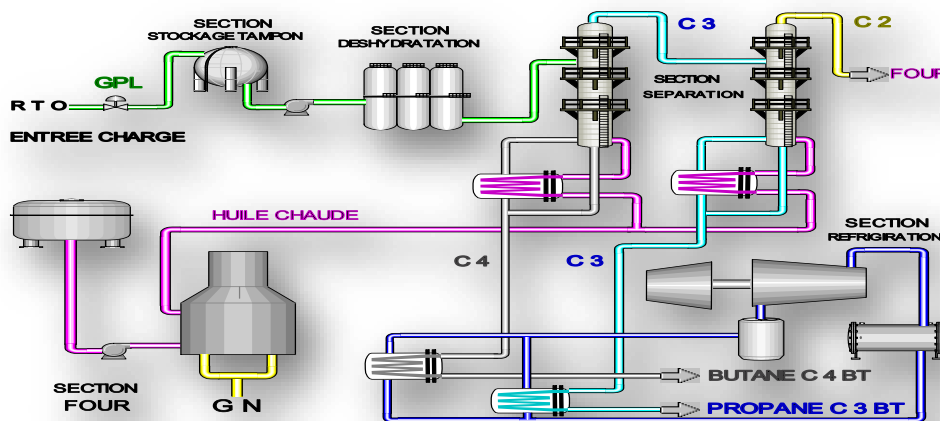


Figure I.8. Schéma du procédé de liquéfaction du GPL

I.8 . Généralité sur le GPL :

I.8.1. Définition du GPL [3]

Le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) est un mélange gazeux principalement composé de propane (C_3H_8) et de butane (C_4H_{10}), avec quelques traces de méthane (CH_4), d'éthane (C_2H_6) et Pentane (C_5H_{12}). À température ambiante et à pression atmosphérique, le GPL se présente sous forme gazeuse. Il est transformé en liquide à basse pression (4 à 5 bar) et à une température très froide pour simplifier son transport, son stockage et sa vente. Il se convertit

en gaz au moment de son utilisation. La composition du GPL varie en fonction de sa provenance

I.8.2. L'origine des GPL [4]

Les gaz de pétrole liquéfiés sont principalement produits :

- Dans les raffineries de pétrole, durant le processus de distillation du pétrole brut. (Reportez-vous à la figure I.9)
- Au cours des opérations de dégazolinage du gaz naturel sur les champs de production, pour obtenir les produits condensables butane et propane (Voir figure I.10),

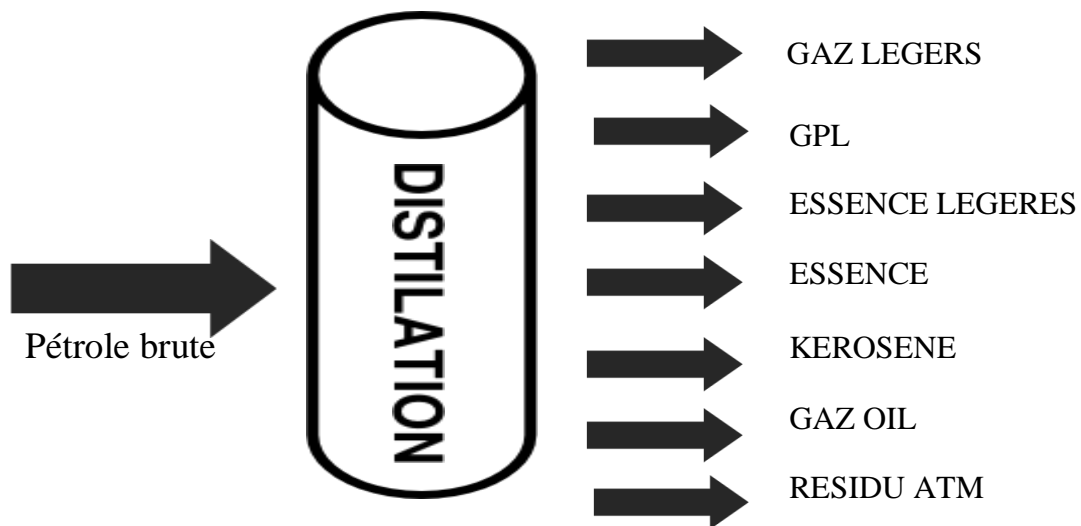


Figure I .9. Récupération des GPL à partir du pétrole Brute

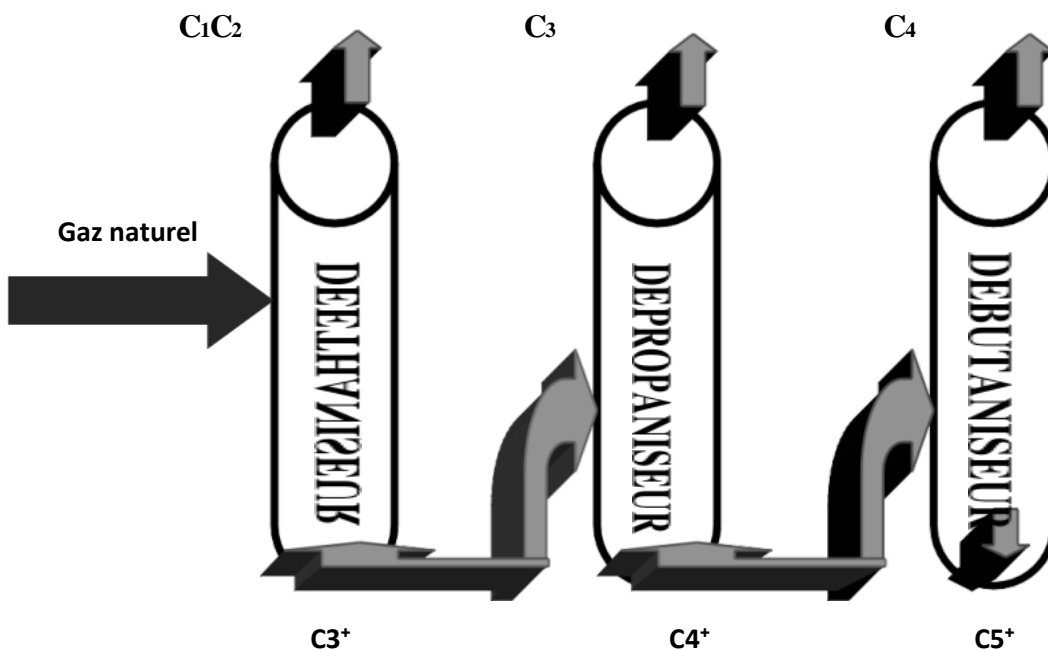


Figure I .10. Récupération du GPL à partir des champs de GN.

I.8.3. Caractéristiques générales des GPL [5]

Les caractéristiques des GPL sont :

- **Odeur** : le GPL est inodore à l'état naturel, mais on doit ajouter un odorant, ce sont des composés sulfures tel que le diéthylmercaptane ou le diméthylsulfide pour des raisons de sécurité.
- **Tension de vapeur** : la TVR du GPL est de 8 et 2 bars pour le propane et le butane respectivement à 20°C.
- **Dilatation** : à l'état liquide, le GPL a un haut coefficient de dilatation dont il faut tenir compte lors de leur stockage (les sphères ne doivent jamais être complètement remplies).
- **Densité** : aux conditions normales de température et pression, le GPL est plus lourd que l'air, sa densité diminue avec l'augmentation de la température.

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

- **Impuretés**: Les plus importantes sont le soufre dans le GPL, leur teneur en soufre est inférieure ou égale à 0.005% en masse et pour le propane l'eau constitue la plus importante impureté.

Il est intéressant de citer que les GPL sont :

- Non corrosif à l'acier et généralement aux cuivres, alliage de cuivre ou aluminium.
- Ils n'ont aucune propriété de lubrification et cet effet doit être pris en considération lors de conception des équipements des GPL pompes et compresseurs.
- Les GPL sont incolores, que soit phase liquide ou vapeur.

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

- **Pouvoir calorifique** : c'est la propriété la plus intéressante étant que le GPL est Traditionnellement utilisé pour les besoins domestiques. Les pouvoirs calorifique des composants du GPL sont regroupés dans le tableau (I.1)

Tableau I.1.comparaison du pouvoir calorifique des composants du GPL

Composé	PC(Kcal/Kg)
Iso-butane	29460
Normal butane	29622
Propane	22506

I.8.4. L'utilisation des GPL [7-9]

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

I.8.4.1. Source de chauffage

L'émergence du gaz naturel et son utilisation croissante à l'échelle mondiale ont entraîné une transformation radicale de l'industrie gazière. En effet, face à ce changement, les fabricants d'équipements ménagers sont confrontés à des défis techniques majeurs. Des brûleurs spécialement conçus pour l'utilisation du Gaz Naturel et des GPL ont donc été développés.

Cette évolution a également été stimulée par l'amélioration du service fourni, les attentes des clients, la quête du meilleur rapport qualité/prix pour les produits ainsi que par les contraintes de plus en plus prépondérantes et inéluctables.

I.8.4.2. Production d'énergie

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

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

I.8.4.3. Climatisation

Il est utilisé pour la construction des réfrigérateurs et des climatiseurs (moyenne capacité) gras à sa détente d'absorption de la chaleur et de créer le froid.

I.8.4.4. Le GPL dans la pétrochimie

La demande pétrochimique globale du GPL enregistre un taux de croissance de l'ordre de 10 %. Il est utilisé comme charge pour le vapocraqueur à fin d'obtenir des oléfines.

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

Le butane est aussi utilisé dans la fabrication de Méthyl Ter-Butyl Ether (MTBE) qui sert comme booster d'octane des essences. ainsi utilisé comme charge pour les unités d'alcoylation. Le propane et le butane sont utilisés pour la production d'acétaldehyde, formaldéhyde, l'acide acétique et l'acétone

I.8.4.5. Le GPL dans L'agriculture :

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

I.8.5. Les risques des GPL[11]

Voici quelques-uns des risques relevés dans le secteur du gaz

- les GPL sont souvent conservés à l'état liquide sous pression ; en cas de fuite, le liquide peut s'évaporer rapidement, générant un vaste volume de gaz inflammable.

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

-L'évaporation des liquides de GPL peut causer des brûlures sévères, des vêtements de protection protection doivent être potés (gants lunette)

Chapitre II.

Systemes de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z.

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

Introduction

La formation d'hydrates dans les conduites de transport et les installations de traitement du GPL constitue un problème majeur pouvant entraîner l'obturation des équipements et perturber le bon fonctionnement du procédé. Afin d'éviter ce phénomène, plusieurs méthodes ont été développées. Parmi celles-ci, la réduction de la teneur en eau par des procédés de déshydratation demeure la solution la plus répandue dans l'industrie. Dans ce cadre, la déshydratation en phase liquide de la charge est généralement réalisée à l'aide de colonnes d'adsorption contenant des tamis moléculaires fonctionnant en parallèle, ce qui permet d'assurer un séchage efficace et continu du fluide.

Ce chapitre est structuré en deux parties : la première est consacrée à la présentation des différents modes de déshydratation du GPL, tandis que la seconde partie traite le fonctionnement des colonnes d'adsorption à tamis moléculaires ainsi que de leur cycle de régénération.

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

II.1. Les modes de déshydratation et tamis moléculaires

La présence d'eau entraîne divers problèmes de fonctionnement, en fonction des conditions de température et de pression régnant dans l'installation ; la vapeur d'eau peut se condenser et provoquer la formation d'hydrates, se solidifier ou favoriser la corrosion si le gaz contient des composants acides. Pour éviter ces phénomènes, il est nécessaire de réduire la teneur en eau du gaz naturel à l'aide de méthodes de traitement appropriées. Cette opération, appelée déshydratation, permet d'assurer le bon fonctionnement des installations et de limiter les risques de corrosion et de formation d'hydrates.

II.1.1. Les modes de déshydratation [18]

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

II.1.1.1. Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates

L'injection d'inhibiteurs thermodynamiques est l'une des stratégies les plus répandues pour prévenir la formation d'hydrates dans les systèmes de production et de transport d'hydrocarbures. Cette méthode consiste à ajouter des composés chimiques capables de modifier les conditions d'équilibre thermodynamique, en abaissant la température de formation des hydrates ou en déplaçant leur domaine de stabilité vers des pressions plus élevées. L'efficacité de cette approche dépend principalement de la nature de l'inhibiteur utilisé et des conditions opératoires du procédé.

Deux méthodes principales d'injection sont généralement distinguées : l'injection de glycol et l'injection de méthanol :

Injection de glycol

La formation des hydrates pendant le refroidissement peut être inhibée par injection de glycol liquide (voir la figure Figure II.1), l'éthylène glycol, le di éthylène glycol. Ce dernier est le plus utilisé à cause de son faible coût et du fait qu'il est le moins soluble dans les hydrocarbures liquides.

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

Le glycol absorbe l'eau, empêchant d'atteindre les conditions dans lesquelles les hydrates

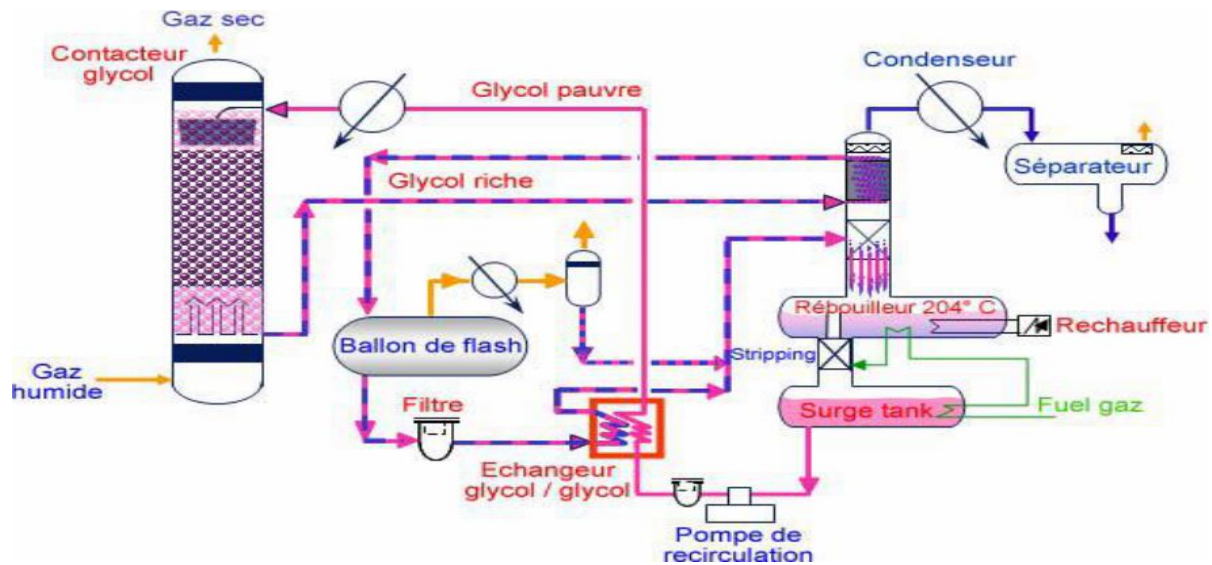


Figure II.1. La déshydratation par injection de glycol

✚ 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.1.1.2. Déshydratation par adsorption dans un liquide :[19, 20]

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).

le procédé illustré par la figure (II.2) met en évidence le rôle du TEG dans l'absorption de l'eau et sa régénération pour garantir un fonctionnement continu

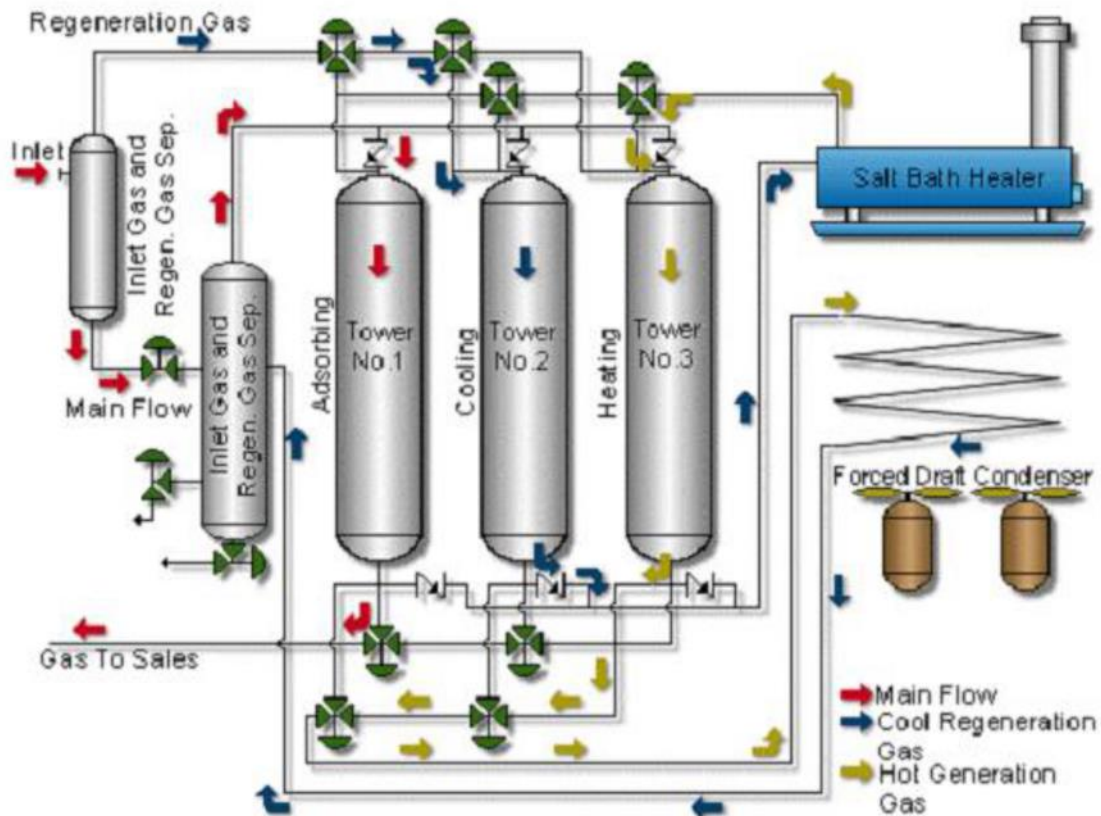


Figure II.3. La déshydratation par adsorption sur un dessiccant solide

✚ 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 une couche ou la répartition des molécules est différente de celle régnant au sein du fluide.

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

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 (micropores) à l'intérieur des particules d'adsorbant, et la taille des pores actuels adsorbants.

La longueur du lit à travers laquelle un incrément de gaz passe pendant le transfert de N'importe quel composant de la phase gazeuse a la phase solide et appelée la zone de transfert de masse (ZMT). (Voir Figure II.4). 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 ceci est détaillé dans la figure (II.5) par la courbe de percée présenté.

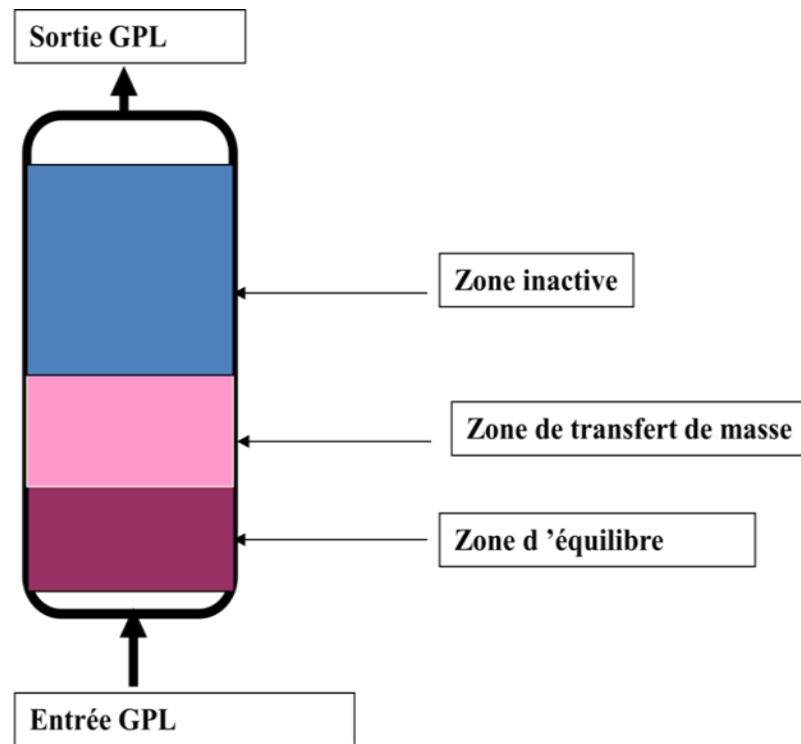


Figure II.4. La zone ZMT se déplace lors de l'adsorption

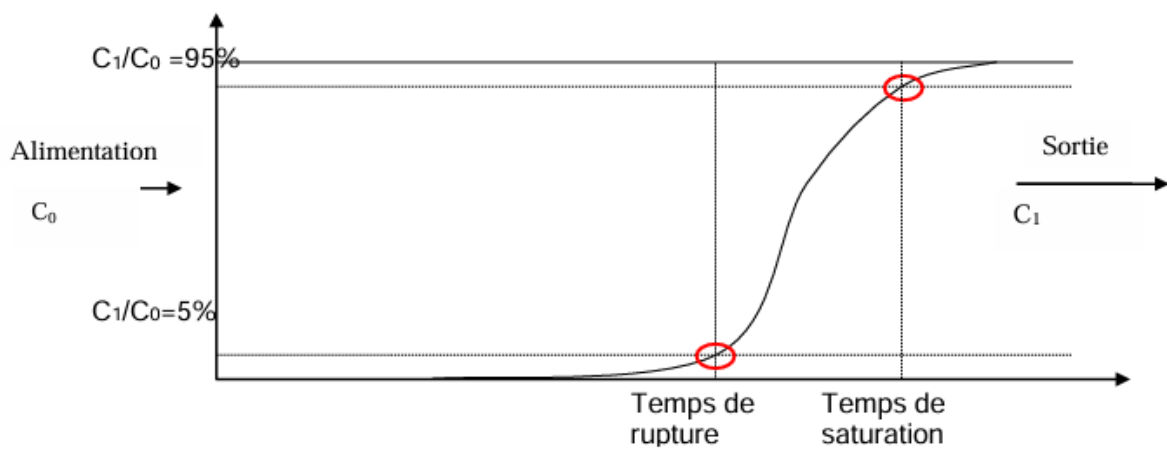


Figure II.5. La courbe de percée.

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.

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

✚ Principaux adsorbants

Il existe plusieurs 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, ce qui force 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.

❖ 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 [26]

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 similaires à 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

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

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 °C

❖ Tamis moléculaire (voir l'annexe 7) [27]

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 °C.

II.1.2. Les tamis moléculaires

II.1.2.1. Définition des tamis moléculaires

Ils 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 1 et 2).

Les tamis moléculaires sont des adsorbants uniques et intéressants

II.1.2.2. Composition des tamis moléculaire

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 3), 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.



Figure II.6. Différentes formes des tamis moléculaire

Dans ce contexte, les diamètres critiques de certaines molécules sont présentés dans le tableau II.1, afin de mettre en évidence l'influence de la taille moléculaire sur les phénomènes d'absorption

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

Tableau II.1 : diamètres critiques certaines molécules

Molécule	Diamètre critique (Å°)
Hydrogéné	2,4
Acétylène	2,4
oxygéné	2,8
Monoxyde de carbone	2,8
Dioxyde de carbone	2,8
azote	3,0
Eau	2,8
Ammoniac	3,6
Sulfure d'hydrogéné	3,6
Méthane	4,0
Ethylène	4,2
Ethane	4,4
Méthanol	4,4
Éthanol	4,4
Mercaptan méthylique	4,5
Propane	4,9
propylène	5,0
Mercaptan éthylique	5,1
Butène	5,1
1,3-Butadiène	5,2
Chlorodifluorométhane (R-22)	5,3
thiophène	5,3
i-Butane à 1-C22 H46	5,6
Dichlorodifluorométhane	5,7
Cyclohexane	6,1
Benzène	6,7
Toluène	6,7
P-Xylène	6,7
M-Xylène	7,1
O-Xylène	7,4
Ttriethylamine lamine	8,4

Par conséquent, la structure finale de tamis moléculaire 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.

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

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.

II.1.2.3. Phénomène d'adsorption d'un tamis moléculaire

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/g de par leur structure cristalline à pores de dimensions bien déterminées, ont une sélectivité d'adsorption maximale

En adsorption dite dynamique, le lit granulaire de matériau adsorbant, placé dans une colonne d'adsorption ou adsorbeur. 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

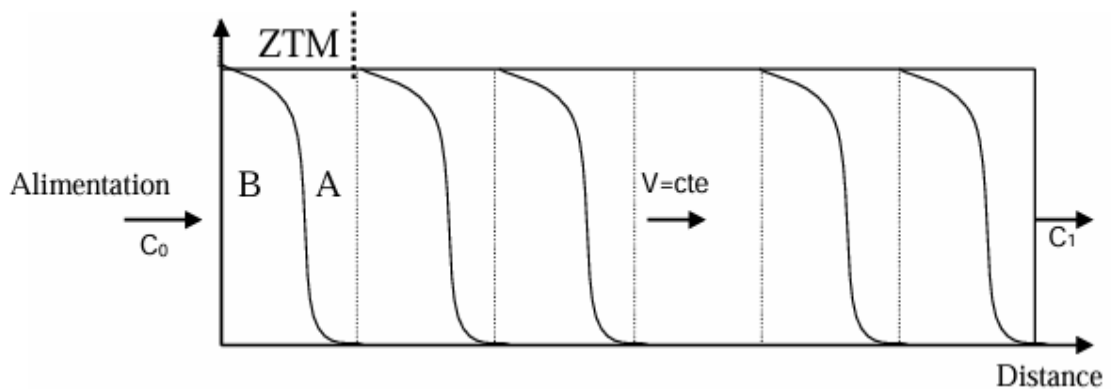


Figure II.7. Évolution de la concentration de l'adsorbat (fluide) au cours de l'adsorption.

✚ 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

- **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.

Tableau II.2: Vitesse et diamètre du lit.

Tamis moléculaire	Capacité utile Adsorp d'eau (%)	Diamètre 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.1.2.4. Les hydrates

- **Définition [28]**

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



Figure II.8. hydrate solide

- **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) montré dans la figure (II.9.a) 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) illustré sur la figure (II.9.b)

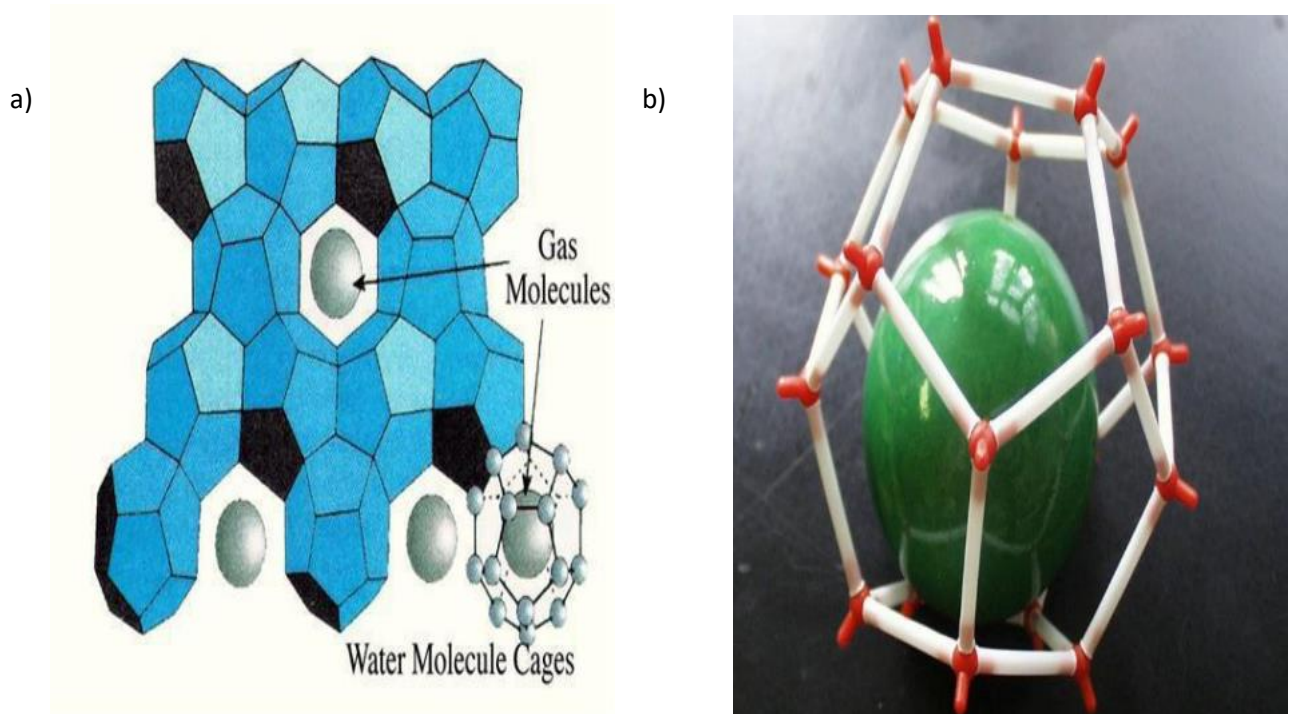


Figure II.9. Structures des hydrates

- **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

- ✓ **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

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

II.2.Généralités sur la section de déshydratation du complexe GP1/Z

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. À 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.2.1. Le cycle de régénération [13]

Sont groupés dans le tableau II.3

Tableau II.3. Les étapes de cycle de régénération

Étapes	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.2.1.1.-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

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

colonne d'adsorption. Le GPL brut est évacué vers les réservoirs sphériques d'alimentation sous la pression du gaz naturel (20 Kg/cm² 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. À 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.

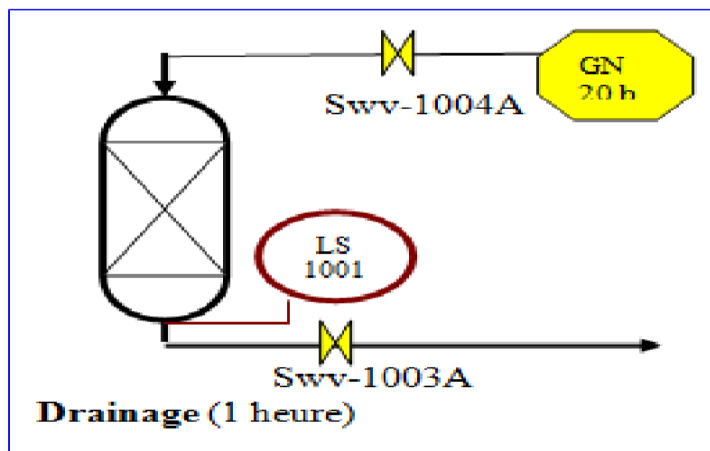


Figure II .10. Séquence de drainage [14]

II.2.1.2. Dépressurisation

Après drainage complet de la colonne d'adsorption, la pression dans V-1001 A est de 20 Kg/cm² eff. Avant de pouvoir commencer la séquence de chauffage, il faut que cette pression soit réduite à 4,5 kg/cm² eff

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

Lorsque PDS-2 signale un débit zéro, la vanne 11 se ferme automatiquement la vanne 7A reste ouverte. La pression dans la colonne est alors de 4,5 kg/cm³ eff la dépressurisation demande environ une demi-heure

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

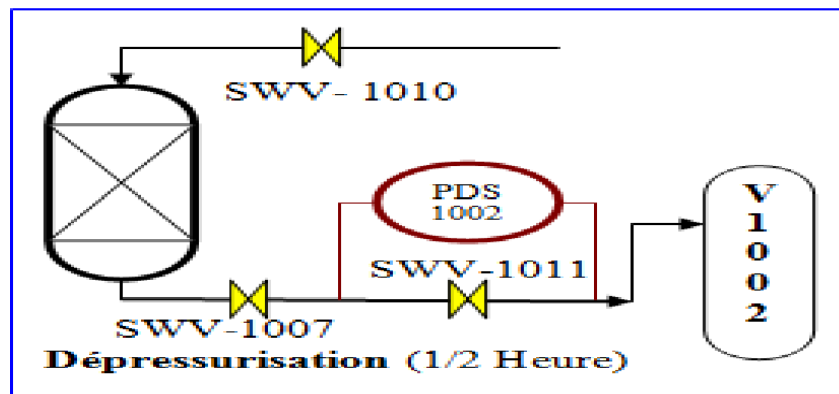


Figure II.11. Séquence de dépressurisation [14]

II.2.1.3. 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. la séquence de chauffage est illustré sur les figures (II.12 et II.13)

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

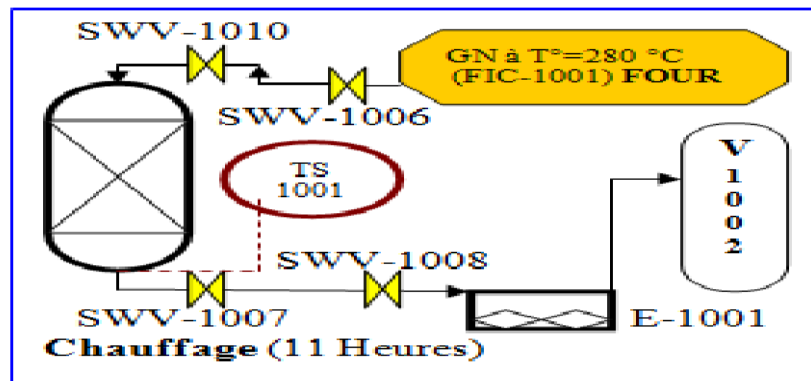


Figure II.12. Séquence de chauffage [14]

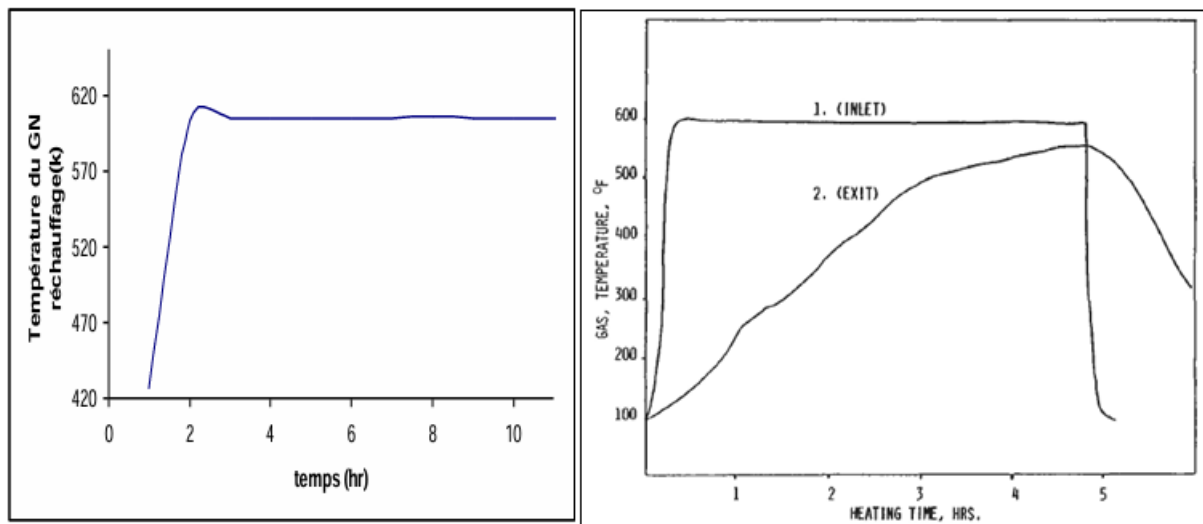


Figure II.13. Evolution de la température durant la séquence de chauffage [15]

La figure II.13 présente l'évolution de la température au cours de la séquence de chauffage appliquée au gaz de régénération du lit adsorbant. Une augmentation rapide de la température est observée au début du procédé, traduisant le transfert progressif de chaleur vers le desséchant saturé afin de favoriser le phénomène de désorption de l'eau retenue dans les pores du tamis moléculaire.

Par la suite, la température tend à se stabiliser autour d'une valeur quasi constante, ce qui indique l'atteinte d'un régime thermique stable permettant d'optimiser la régénération du lit adsorbant. Cette étape est primordiale puisqu'elle assure la restauration de la capacité d'adsorption du matériau avant sa remise en service dans le cycle de déshydratation. Ainsi, le

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

contrôle de la température et du temps de chauffage constitue un paramètre essentiel pour garantir l'efficacité du procédé et éviter toute dégradation du desséchant

II.2.1.4. 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

Le schéma du procédé de refroidissement est montré sur la(figure II.14)

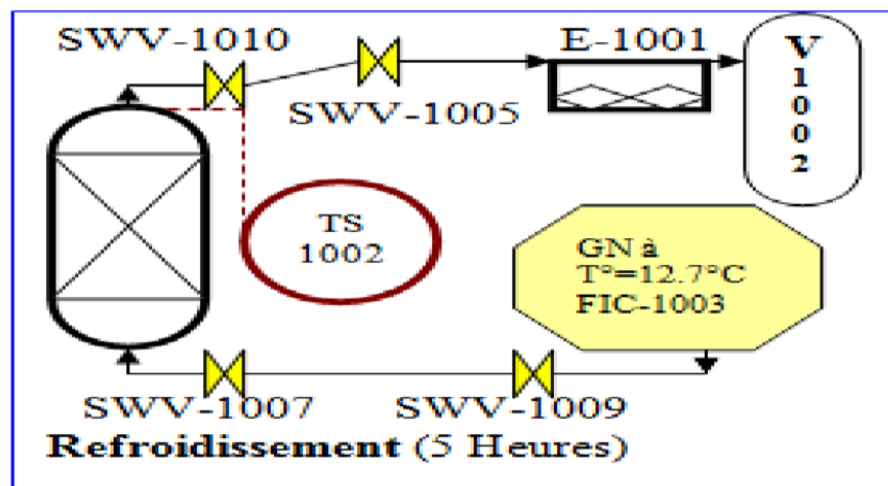


Figure II .14. Refroidissement [14]

II.2.1.5. Remise sous pression (Pressurisation)

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

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

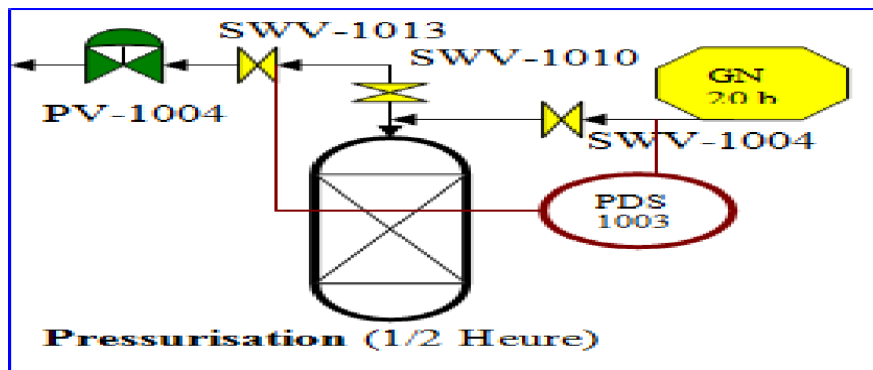


Figure II.15. Pressurisation [14]

II.2.1.6. Remplissage en liquide

À cette étape, la vanne de remplissage reçoit l'ordre de s'ouvrir, pour permettre l'admission du liquide GPL par le bas de l'absorbeur. Au fur et à mesure que le niveau monte dans le sécheur ; le gaz emprisonné se comprime en créant l'augmentation de pression. Lorsque cette dernière atteint le point de consigne du contrôleur de pression, le surplus est évacué vers la torche .

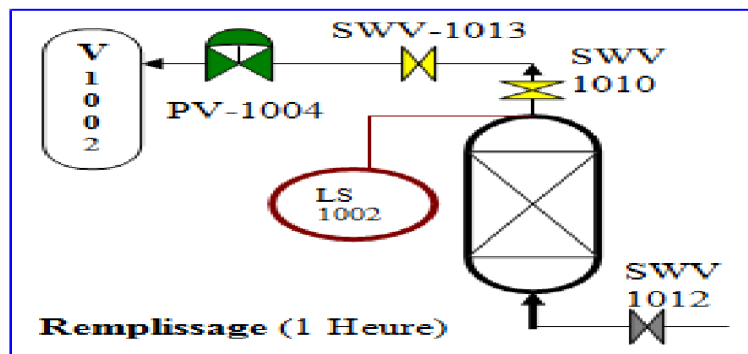


Figure II.16. Remplissage [14]

Chapitre II : système de déshydratation de charge dans le complexe GP1/Z

Le schéma globale de la section de déshydratation de charge train NO.7 du complexe GP1/Z est présenté dans la (figure II.17)

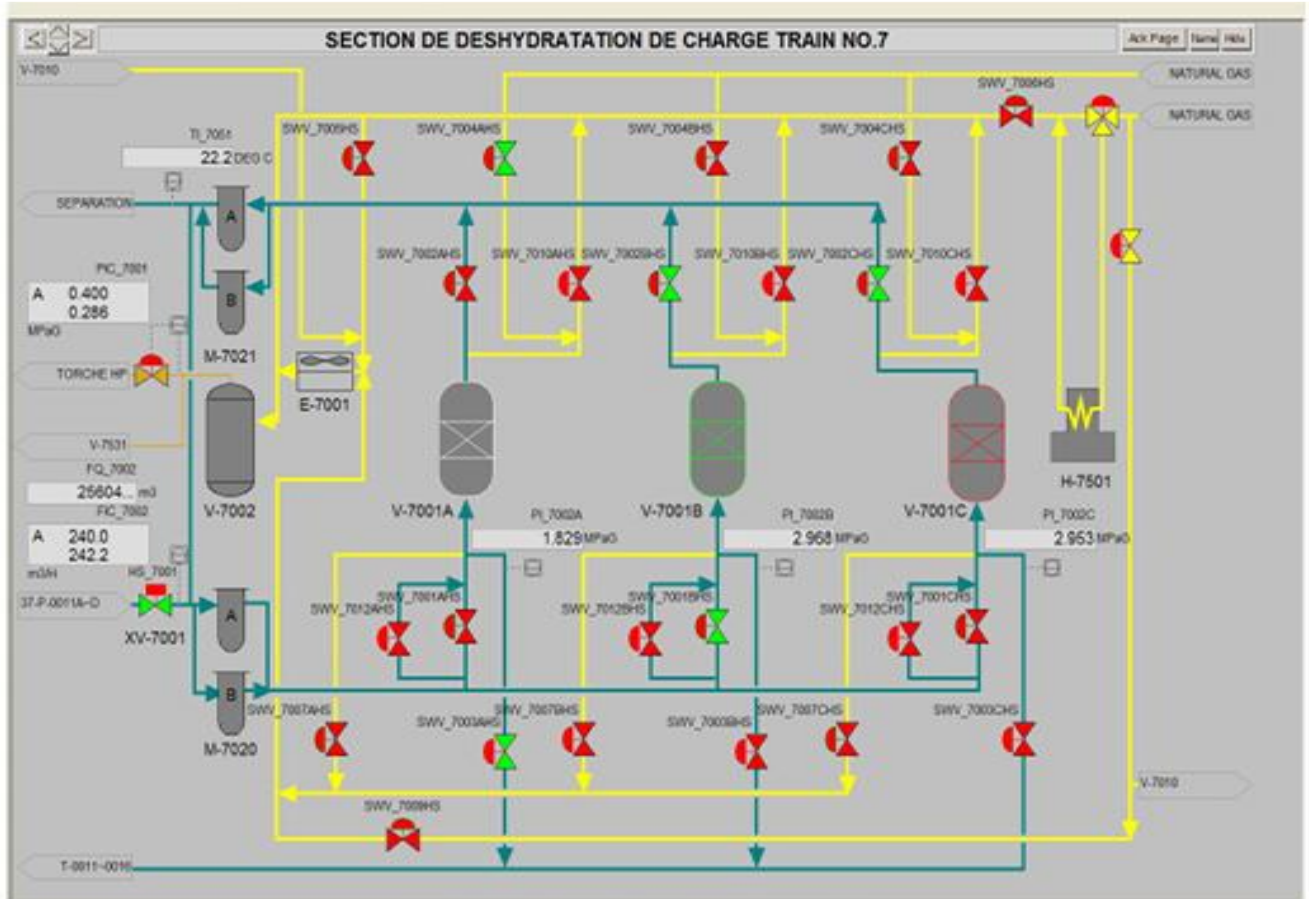


Figure II.17. Schéma de la section déshydratation.

Chapitre III.

Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge.

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

III.1. INTRODUCTION

La conception du système de déshydratation du complexe GP1/Z a été élaborée en visant une concentration en eau dissoute dans la charge GPL de 100 ppm. Cependant, nous avons constaté qu'il n'est pas possible d'atteindre cette teneur actuellement, en raison du prétraitement de la charge provenant du sud. Dans ce contexte nous allons discuter l'influence de la diminution de la teneur en eau du GPL sur le fonctionnement de la section de déshydratation de charge. Dans le but de l'augmentation de la durée d'adsorption et de la réduction de la durée de régénération (réchauffage).

Ce chapitre présente la problématique et méthode de calcul des paramètres de fonctionnement ainsi que les solutions à proposées pour utilisés dans la section de déshydratation de charge.

III.2. Problématique

Pour une concentration en eau de 100ppm, on a établi que le temps d'adsorption était de 36 heures et le temps de régénération de 19 heures. Cependant, les niveaux d'eau présents dans les charges GPL se trouvent actuellement réduits à des valeurs pouvant descendre en dessous de 25 ppm, ce qui fait que le tamis n'est pas entièrement exploité.

L'objectif de notre étude est d'optimiser les paramètres de fonctionnement de processus de déshydratation de charge en tenant compte des différentes teneurs en eau. C'est pour cette raison nous avons débuté par la recherche de solutions potentielles à notre problème.

Cette étude nous autorise à examiner les deux options suivantes :

- Solution 1 : étude de la prolongation de la durée d'adsorption.
- Solution 2 : étude de la réduction de la durée de régénération (réchauffage).
 - **Présentation graphique :**

Selon les mesures de teneur en eau prises pendant notre stage, nous avons établi un rapport sur le taux d'humidité du GPL entrant dans le sécheur. Nous avons assuré la surveillance tout au long du mois de novembre 2025.

La courbe de la **figure III.1** retrace le suivi de la teneur en eau de GPL à l'alimentation dans le déshydrater pendant un mois.

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

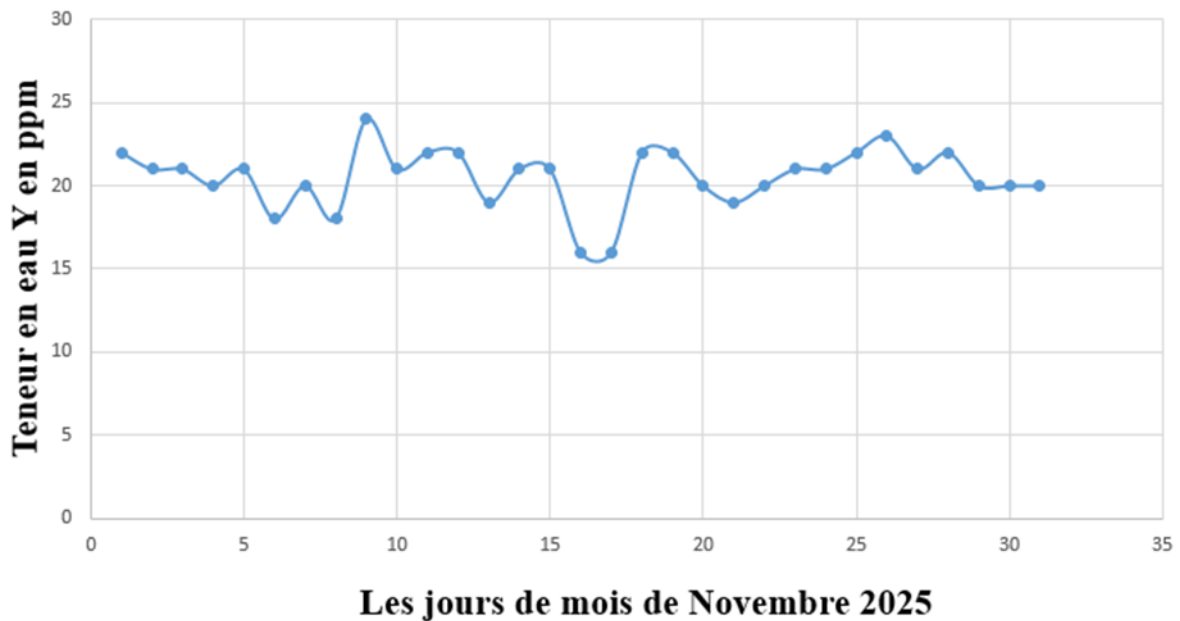


Figure III.1. La variation de la teneur en eau dans la charge d'alimentation durant le mois de Novembre 2025.

À partir de la **figure III.1** nous avons constaté que la concentration de l'humidité ne dépasse pas 24 ppm, ce qui est bien en dessous de la valeur design (100 ppm).

Par conséquent le sécheur fonctionne en dessous de son potentiel d'adsorption, ce qui entraîne des pertes considérables d'énergie.

III.3. Constitution d'un déshydrater de charge [24,27]

Le tamis moléculaire est la partie essentielle d'une colonne de déshydratation qui agit comme agent adsorbant. Il est recouvert d'une couche de billes en céramique (alumine) de 150 mm d'épaisseur, elle-même recouverte d'une couche similaire.

➤ Les caractéristiques du tamis moléculaire

Les caractéristiques du tamis moléculaire sont données dans le **tableau (III.1)** qui présente la fiche technique du tamis moléculaire.

Tableau III.1. La fiche technique du tamis moléculaire [26].

Paramètre des tamis	Valeurs
Diamètre nominal des pores	4Å
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	2%
Capacité en eau à l'équilibre	22%
Capacité calorifique	0.22 kcal / Kg °C

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

✚ Les conditions opératoires d'adsorption / désorption [24]

Les conditions opératoires d'adsorption/désorption tel que la durée d'adsorption, durée de régénération, temps de réchauffage et de refroidissement sont regroupées dans le **tableau (III.2)**.

Tableau III.2. Les conditions opératoires d'adsorption/désorption.

Durée d'adsorption	Durée de régénération	Réchauffage	Refroidissement
36h	19h	11h	5h

✚ Température d'entrée du gaz de régénération [26]

La température du gaz de régénération déterminée en fonction des conditions d'utilisation nécessaires pour confirmer une régénération efficace :

- ✓ Réchauffage à $T = 280^{\circ}\text{C}$.
- ✓ Refroidissement à $T = 12.7^{\circ}\text{C}$.

III.4. La méthode de calcul des paramètres de fonctionnement

Cette méthode vise à déterminer le temps d'adsorption en fonction de la quantité d'eau présente dans la charge, en optimisant les paramètres fonctionnels du cycle de chauffage.

✚ Calcul du temps d'adsorption

Le temps d'adsorption (t_{ads}) égale à la quantité d'eau adsorbée divisé par la teneur en eau dans la charge de GPL multiplié par la masse volumique de la charge et le débit volumique de la charge. Il est donné par la formule suivant :

$$t_{\text{ads}} = M_{\text{ads}} / (Y_{\text{in}} * Q * \rho_{\text{GPL}})$$

Avec :

M_{ads} : la quantité d'eau adsorbée.

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

P_{GPL} : Masse volumique de la charge (Lb/ft^3).

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

On peut utiliser aussi la formule suivante:

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

Où :

X : La quantité réelle d'eau adsorbée par 100Lb de dessinant.

ρ_{tamis} : Masse volumique de tamis (Lb/ft^3).

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

q_w : Débit d'eau (Lb/ft² h).

✚ Calcul du temps de réchauffage

Le temps de réchauffage (t_r) est égale à la chaleur fournie par le four divisé par la déférence de l'enthalpie du gaz multiplié par le débit du gaz de chauffage . Il est donné par la relation suivant :

$$t_r = H_f / (\Delta H_{(T_s - T_e)} * M_g)$$

Avec :

H_f : La chaleur fournie par le four pendant le réchauffage (BTU).

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

M_g : Le débit du gaz de chauffage (Nm³ / h).

✚ Modèle générale de calcul de la prolongation de la durée d'adsorption et de la réduction de la durée de régénération

Le mode général de calcul de temps d'adsorption est regroupé dans l'organigramme présenté dans la **figure III.2**.

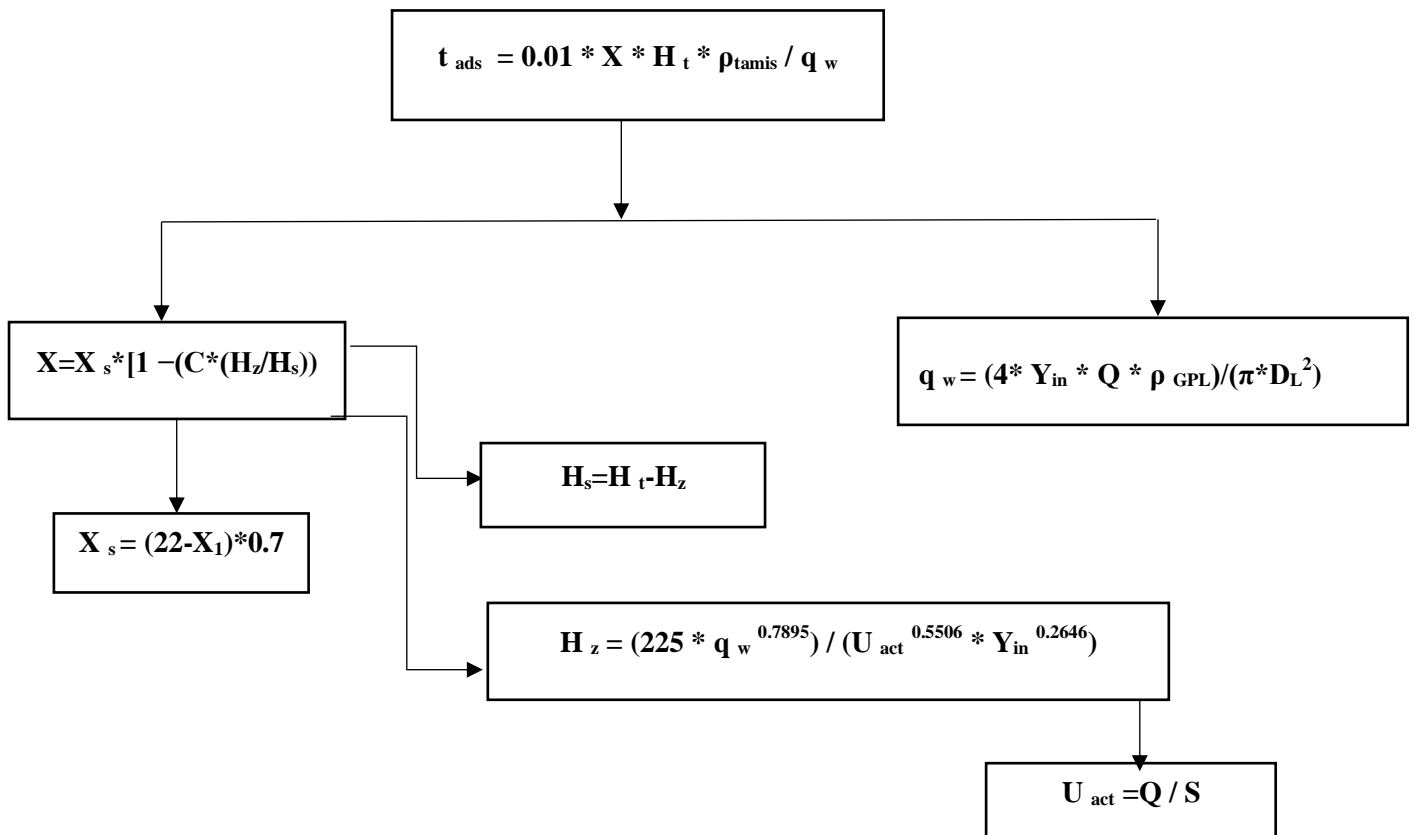


Figure III.2. L'organigramme de calcul générale de la prolongation de la durée d'adsorption.

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

Afin de déterminer les temps d'adsorption et de réchauffage, il est nécessaire d'établir les bilans thermique et matière. Ces bilans sont indispensables de notre travail, pour estimer et évaluer la quantité de chaleur requise ainsi que le débit de gaz naturel adéquat pour la régénération du sécheur.

III.4.A. Bilan Énergétique [27]

Pour assurer le calcul du bilan énergétique il faut établir les calculs suivants :

A.1. Calcul de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération

La quantité de chaleur nécessaire à la régénération est égale la somme des quantités de chaleur partielles à savoir la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis, d'acier, la chaleur nécessaire à la désorption de l'eau fixée sur le tamis et Q pertes ($Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}} + Q_{\text{des}}$) Q_{totale} est donnée par la formule suivant :

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

Où :

Q tamis : La chaleur nécessaire au réchauffage du tamis (BTU).

Q acier : La chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier (BTU).

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

A.2. Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption de l'eau Q_{des}

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

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

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

M_{ads} : La quantité d'eau adsorbée (Lb).

A.3. Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis

La chaleur nécessaire au réchauffage du tamis (Q_{tamis}) est égale à la masse totale du tamis multiplie par la capacité calorifique du tamis multipliée par la différence de température moyenne du lit en fin de réchauffage est température d'adsorption. Elle est calculée par relation (3) :

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

Avec :

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

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

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

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

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

A.4. Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier

La chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier (Q_{acier}) est égale la masse totale d'acier multipliée par la capacité calorifique d'acier multipliée par la différence de température moyenne du lit en fin de réchauffage et la température d'adsorption ;

$$Q_{acier} = m_c * C_{pC} * (T - T_{ads}) \dots\dots\dots (4)$$

Où

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

C_{pC} : La capacité calorifique de l'acier (BTU / lb $^{\circ}F$).

A.5. Calcul des pertes de chaleur

Des pertes de chaleur (Q_{perte}) est Considérées comme étant égales à 10% de la somme ($Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des}$) (BTU). Elle est exprimée par la relation (5).

$$Q_{perte} = 0.1 * (Q_{des} + Q_{tamis} + Q_{acier}) \dots\dots\dots (5)$$

Pour évaluer les besoins en chaleur (Q_{totale}), il est nécessaire de déterminer la température du lit à la fin du cycle de chauffage « T ».

- Calcul de la température du lit « T » [27]

On peut l'obtenir par la relation suivante :

$$T = T_s - (T_e - T_s) / 2 \dots\dots\dots (6)$$

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

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

A.6. Calcul de la chaleur H_f fournie par le four [27]

La chaleur fournie par le four c'est la valeur de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération divisé par l'efficacité thermique de four. Elle est donnée par la formule suivante

$$H_f = Q_{totale} / (1/\epsilon) \dots\dots\dots (7)$$

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

Q_{totale} : La quantité totale de chaleur à la régénération (BTU).

A.7. Calcul du temps de réchauffage du tamis t_r [28]

Est donnée par la relation (8).

$$t_r = H_f / (\Delta H_{(T_i - T_e)} * M_g) \dots\dots\dots (8)$$

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

Avec :

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

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

t_r : Le temps de chauffage(h).

A.8. Calcul de la chaleur fournie par le four pendant cycle

La chaleur fournie par le four est déterminée par la relation (9).

$$H_{f/cycle} = (H_f * t_r) / t_{ads} \dots\dots\dots (9)$$

$$H_{f/cycle} = (3 * H_f * t_r) / C_{cycle}$$

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

Avec :

$H_{f/cycle}$: la chaleur fournie par le four pendant cycle (BTU/h).

t_r : le temps de réchauffage (h).

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

A.9 Calcul du temps de refroidissement du tamis

Le temps de refroidissement du tamis (t_{ref}) c'est la somme de la quantité de chaleur du tamis et acier divisé par la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération multiplié par le temps de réchauffage. Il est exprimé par la relation (10).

$$t_{ref} = ((Q_{tamis} + Q_{acier}) / Q_{totale}) * t_r \dots\dots\dots (10)$$

A.10. Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}

La chaleur soutirée au système (Q_{ref}) c'est la somme de la quantité de chaleur du tamis et acier divisé par la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération divisé par le temps de refroidissement. Donne par la relation (11).

$$Q_{ref} = (Q_{tamis} + Q_{acier}) / t_{ref} \dots\dots\dots (11)$$

III.4.B. Bilan de matière de la régénération [27]

Pour assurer le calcul du bilan de matière il faut établir les calculs des paramètres suivant :

B.1. Calcul du débit du gaz de refroidissement

Le débit du gaz de refroidissement est calculé comme suit la relation (12).

Où : $M_{ref} = Q_{ref} / \Delta H_{(T_s-T_e)} \dots\dots\dots (12)$

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

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

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

$Q_{\text{réf}}$: la chaleur soutirée au système. (BTU/ h).

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

B.2. Calcul de la chute de pression [27]

La perte de charge par unité de longueur est donnée par l'équation (13).

$$\Delta P/L = A * \mu * U + B * \rho_{GN} * U^2 \dots \dots \dots (13)$$

Où :

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

μ : la viscosité du GN (Cp) .

U : la vitesse superficielle (ft / min).

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

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

A = 0.0561 et **B** = 0.0000889.

B.3. Calcul du nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est calculé par la formule (14) .

$$Re = (G * D_p) / \mu \dots \dots \dots (14)$$

Avec :

G : débit.

D_p : Le diamètre.

μ : Viscosité dynamique.

III.5. Fiabilité de la méthode [27]

Avant d'entamer nos calculs, nous avons vérifié la fiabilité de la méthode que nous avons choisie.

Où, nous allons recalculer la capacité d'un sécheur de la section déshydratation de la charge pour un niveau de traitement de 100 %.

Nous allons principalement réviser le calcul de la quantité de chaleur nécessaire pour la régénération et le flux adéquat. Pour cela on donne la propriété du GPL de charge à utilisé

- **Propriété du GPL**

La charge de GPL à traiter alimentant la section déshydratation ayant la propriété ci-dessus :

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

- ◆ Débit de traitement à 100% : $Q = 240 \text{ m}^3/\text{h} = 8675.09 \text{ ft}^3/\text{h}$
 - ◆ La pression : $P = 30.7 \text{ Kg} / \text{cm}^2$
 - ◆ La Température : $T = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298.15 \text{ K}$
 - ◆ Solubilité de l'eau dans le GPL à $T=25^\circ\text{C}$ (voir Annexe 3)
 - ◆ 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: $\rho_{\text{GPL}} = 530 \text{ Kg} / \text{m}^3 = 33.09 \text{ Lb}/\text{ft}^3$
- ✓ La composition de la charge du GPL est mentionnée dans le **tableau III.3**.

Tableau III.3. Composition de la charge du GPL [25]

Composant	C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄	i-C ₅	n-C ₅	C ₆
M (g/mol)	16.043	30.07	44.097	58.123	58.123	72.15	72.15	86.177
Titre molaire Y _i (%)	0.24	1.91	59.40	13.71	24.6	0.21	0.05	0.00

En utilisant les données du tableau **III.3**, on détermine le poids moléculaire du GPL par la relation (*)

◆ Poids moléculaire du GPL : $M_{\text{GPL}} = \sum Y_i * M_i \dots \dots \dots (*)$

$M_{\text{GPL}} = 49.26 \text{ Kg} / \text{K mole}$

III.5.1. Dimensionnement d'un déshydrater [24]

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

Pour assurer le calcul de la quantité d'eau adsorbée il faut établir ces calculs :

Diamètre minimum du lit

Diamètre minimum du lit est donné par la relation (15).

$$D_{\min} = [(4 * (\rho_{\text{GPL}} * Q) / (\pi * G))]^{0.5} \dots \dots \dots (15)$$

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 / h).

G : Vitesse massique de l'écoulement de fluide (Lb /ft² .h).

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

Pour les tamis moléculaires, la vitesse massique de l'écoulement est donnée par la formule (16).

$$G = 3600 * (C * \rho_{\text{tamis}} * \rho_{\text{GPL}} * D_p)^{0.5} \dots\dots\dots (16)$$

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

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

C : Constante relative aux tamis moléculaire (C = 1.06).

✓ Application Numérique :

D_p=0.01ft

ρ_{tamis}=641kg/m³=40.02 Lb/ft³

ρ_{GPL}=530 kg/m³=33.09 Lb/ft³

g=32.2ft/sec² C=1.06

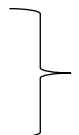


en appliquant l'équation (16)

G=13487.83 Lb / ft².h

G= 13487.83(Lb / ft².h)

Q = 240 m³ / h = 8675.09 ft³ /h



en appliquant l'équation (15)

D_{min} = 5.20 ft= 1.58m

✚ **La hauteur totale du lit**

La hauteur totale du lit est déterminée par la relation suivante :

$$H_t = H_s + H_z \dots\dots\dots (17)$$

Où :

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

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

III.5.2. Calcul de la vitesse actuelle d'écoulement de fluide

U_{act} est déterminée par la relation suivante :

$$U_{\text{act}} = Q / S \dots\dots\dots (18)$$

$$S = (\pi * D_L^2) / 4$$

D_L : le diamètre du lit. (D_L=2.1 m =6.89 ft).

U_{act}= 232.67 (ft/h) = 3.877 (ft/min) = 0.06 (ft/sec)

III.5.3. Calcul du débit d'eau

Débit d'eau (q_w) est déterminée par la relation (19).

$$q_w = (4 * Y_{\text{in}} * Q * \rho_{\text{GPL}}) / (\pi * D_L^2) \dots\dots\dots (19)$$

Où:

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

Q : Débit volumique de la charge

$$Q=8675.09\text{ft}^3/\text{h}$$

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



$$q_w=0.77 \text{ Lb}/\text{ft}^2 \text{ h}$$

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

III.5.4. Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse

La hauteur de la zone de transfert de masse (H_z) est déterminée par la relation (20).

$$H_z = (225 * q_w^{0.7895}) / (U_{\text{act}}^{0.5506} * Y_{\text{in}}^{0.2646}) \dots\dots\dots(20)$$

$$H_z=18.82\text{inch} =1.56 \text{ ft} =0.47 \text{ m}$$

III.5.5. Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre

La hauteur de la zone d'équilibre est déterminée par la relation (21).

$$H_s=H_t-H_z\dots\dots\dots(21)$$

Avec :

H_t : la hauteur totale du lit (H_t=1.8m=(5.9ft).

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

$$H_s=1.33\text{m} = 4.34\text{ft}$$

III.5.6. Évaluation 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-X₁)

X₁ : la teneur en eau résiduelle, (X₁= 1.5 % en poids).

En raison des réductions de capacité dues à l'adsorption causées par le colmatage des pores, la dégradation des cristaux, l'agression chimique, etc., il est approprié d'ajouter une quantité de tamis pour pallier l'effet du vieillissement.

Si on prend en compte une diminution de 5% par an de la capacité d'adsorption et une longévité du tamis fixée à trois ans.

Coefficient d'usure pris égale à 70% .

La capacité sera en fin de compte égale à :

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

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

III.5.7. Évaluation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100Lb de dessinant (X)

Pour calcul la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessinat à partir l'équation (22).

$$X=X_s*[1 -(C*(H_z/H_s))] \dots\dots\dots (22)$$

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

Avec :

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

$$X=12.06 \text{ Lb d'eau /100Lb de dessinant}$$

III.5.8. Évaluation de la quantité d'eau adsorbée

La quantité d'eau adsorbée (M_{ads}) est déterminée par la relation (23).

$$M_{ads} = ((H_s - (C * H_z)) * (X_s * D_L^2 * \rho_{tamis})) / 127.38 \dots \dots \dots (23)$$

Avec :

$$H_z = 1.56 \text{ ft}$$

$$H_s = 4.34 \text{ ft}$$

$$D_L = 6.89 \text{ ft}$$

$$\rho_{tamis} = 40.02 \text{ Lb/ft}^3$$



$$M_{ads} = 778.6259 \text{ Lb}$$

III.5.9. Calcul du temps d'adsorption

Le temps d'adsorption est déterminée par la relation (24) .

$$t_{ads} = 0.01 * X * H_t * \rho_{tamis} / q_w \dots \dots \dots (24)$$

$$t_{ads} = 36.98 \text{ h.}$$

III.5.10. Détermination de l'efficacité d'adsorption

L'efficacité d'adsorption est déterminée par la relation (25).

$$E_{ff} = X/X_s \dots \dots \dots (25)$$

$$E_{ff} = 84.04$$

A. Calcul du bilan énergétique [25]

Pour assurer le calcul du bilan énergétique il faut établir ces calcul

✚ Propriété du gaz de régénération

A.1. La composition du gaz de régénération :

Pour en savoir plus sur le gaz de régénération, nous mentionnons certaines de ses propriétés et leur composition dans le tableau III.4.

Tableau III.4. La composition du gaz de régénération

Composant	Y_i en mol	$T_{ref}(K)$ 12.7°C	$T_{rec}(K)$ 280°C	ΔH° (Kj/Kg)	M (kg/kmol)	Y'_i g	$\Delta H^\circ * Y'_i$
C ₁	0.839	285.85	553.15	579.68	16	0.72	416.17
C ₂	0.074	285.85	553.15	500,973	30	0.12	59.48

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

C ₃	0.018	285.85	553.15	432.462	44	0.04	18.32
i-C ₄	0.0026	285.85	553.15	495.459	58	0.01	4.00
n-C ₄	0.0008	285.85	553.15	495.927	58	0.00	1.23
i-C ₅	0.004	285.85	553.15	473.648	72	0.02	7.30
n-C ₅	0.0009	285.85	553.15	491.658	72	0.00	1.70
C ₆	0.0003	285.85	553.15	493.958	86	0.00	0.68
N ₂	0.0562	285.85	553.15	230.951	28	0.08	19.44
CO ₂	0.0024	285.85	553.15	210.512	44	0.01	1.99
He	0.0018	285.85	553.15	0.00	4	0.00	0.00
Totale	1				18.71	1	529.497

- Poids moléculaire du GN : $M_{GN} = \sum_{i=1}^n Y_i * M$

$$M_{GN} = 18.6982 \text{ Kg/kmol}$$

- Le gaz naturel de réchauffage :

$$\text{Température } T_{rec} = 280^\circ\text{C}$$

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

- Le gaz naturel de refroidissement :

$$\text{Température } T_{ref} = 12.7^\circ\text{C}$$

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

✚ La masse volumique du GN dans les conditions normal

La massr volumique de GN déterminée par la relation (*).

$$\rho_{GN} = (P * M_{GN}) / (Z * R * T) \dots \dots \dots (*)$$

Les donnes utilisée sont :

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

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

$$Z = 1$$

$$M_{GN} = 18.6982 \text{ Kg/Kmol}$$

$$R = 0.0821 \text{ l atm/mol k}^\circ$$

Le calcul par la relation (*) donr

$$\rho_{GN} = 0.84 \text{ Kg/Nm}^3$$

✚ L'enthalpie de chauffage du gaz de 12.7°C à 280°C

L'enthalpie de chauffage du gaz est déterminée par la relation (Z)

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

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

Avec :

ΔH : l'enthalpie qui fournit par le four exprimée en (KJ / Kg), (Tableau (III.3)).

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

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

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

$$\Delta H = 529.497 \text{ KJ/Kg} = 227.630 \text{ BTU/Lb}$$

A.2. Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis

Pour déterminer la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q_{tamis} , il faut calculer la masse du tamis avec l'équation suivante

✓ **Calcul de la masse du tamis :**

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

$$D_L = 6.89 \text{ ft} ; H_t = 5.9 \text{ ft} ; \rho_{\text{tamis}} = 40.02 \text{ Lb/ft}^3$$

$$m_t = 8803.54 \text{ Lb}$$

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

On appliquant l'équation (06) pour calcul T

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

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

$$T = 200.5 \text{ }^\circ\text{C} = 392.9 \text{ }^\circ\text{F} = 473.65 \text{ }^\circ\text{K}$$

Suite on appliquant equation (3) pour déterminer Q_{tamis}

Avec :

$$C_{p_t} = 0.22 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{F}$$

$$m_t = 8803.54 \text{ Lb}$$

A.3. Calcul de la chaleur nécessaire $Q_{\text{tamis}} = 6.118 * 10^5 \text{ BTU}$ l'acier Q_{acier}

Pour déterminer Q_{acier} , il faut calculer la masse d'acier avec l'équation (B)

✓ **Calcul de la masse d'acier :**

$$m_{\text{acier}} = V_c * \rho_{\text{acier}} \dots\dots\dots(B)$$

Où :

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

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

On obtient $m_{\text{acier}} = 20195 \text{ Lb}$

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

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

D'après les données utilisées

$$m_c = 2.73 \cdot 10^4 \text{ Lb} ; C_{pc} = 0.12 \text{ BTU/Lb } ^\circ\text{F} \quad T = 392.9^\circ\text{F} ; T_{ads} = 77^\circ\text{F}$$

A partir de l'équation (4), on obtient $Q_{acier} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU}$

A.4. Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}

Q_{des} est déterminé d'après l'équation (2)

- ✓ La quantité d'eau adsorbée $M_{ads} = 778.626$
- ✓ La chaleur de désorption $\Delta H = 1800 \text{ BTU/Lb}$

$$Q_{des} = 1.4 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

A.5. Calcul des pertes de chaleur Q_{perte}

On calcule Q_{perte} ; par l'équation (5)

Donc : $Q_{perte} = 3.041 \cdot 10^5 \text{ BTU}$

A.6. Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale}

On détermine la chaleur totale nécessaire à la régénération à partir l'équation (1)

$$Q_{totale} = 3.35 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

A.7. Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage H_f

Le calcul H_f est établi par l'équation (7).

$$H_f = 8.82 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

A.8. Calcul du temps de réchauffage du tamis

Pour calculer le temps de réchauffage on utilise les propriétés du gaz de régénération groupés dans le tableau III.5.

A partir l'Annexe 5 :

Tableau III.5. Les propriétés du gaz de régénération

Quantité de chaleur apportée par le GN : H_f (BTU)	$1.02 \cdot 10^7$
Déférence de l'enthalpie ($\Delta H_{(280-12.7)^\circ\text{C}}$: BTU/Nm ³)	1179.47
Masse volumique du GN : ρ_{GN} (Lb/Nm ³)	1.8298

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

Température finale (T_f : °F)	536
Température initiale (T_i : °F)	54.86

D'après l'équation (8), on obtient **$t_r=11h$**

Avec :

M_{GN} : débit du GN sortant du four 2132 Nm³/h ; $\Delta H=421\text{BTU}/\text{Nm}^3$.

A.9. Calcul de la chaleur fournie par le four par de $H_{f/CYCLE}$

Pour calcul la chaleur fournie ($H_{f/CYCLE}$) on utilise l'équation (9)

A partir ces données on obtient **$H_{f/CYCLE}= 3.03*10^6 \text{BTU}/h$**

$t_r=11h$

$t_{ads}=36.98h$

A.10. Calcul du temps de refroidissement du tamis t_{ref}

Temps de refroidissement du tamis est calculée à partir l'équation (10)

On obtient temps de refroidissement est : **$t_{ref}=5h$**

A.11. Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}

Q_{ref} est calculée par l'équation (11) .

$Q_{tamis}=6.12*10^5 \text{BTU}$

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

$t_{ref}=5h$

$Q_{ref}=3.28*10^5 \text{BTU}/h$

B. Calcul du bilan de matière de la régénération

Pour déterminer le bilan de matière il faut établir ces calculs :

B.1. Calcul du débit du gaz de refroidissement

Le débit du gaz de refroidissement (M_{ref}) est calculée par l'équation (12) .

$M_{ref}=779.09 \text{Nm}^3/h$

✚ Calcul des pertes de charges

✓ Calcul de la perte de charge $\Delta P/L1$ pour le GN chaud

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

Pour calcul le $\Delta P/L_1$, il faut d'abord calcul la masse volumique de GN et la vitesse superficielle .

Le gaz naturel de réchauffage :

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

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

- Calcul la masse volumique de GN est calculé par la formule (y).

$$\rho_{GN} = (P * M_{GN}) / (Z * R * T) \dots\dots\dots(y)$$

Z : est facteur de compressibilité 1kg/m^3

$$M_{GN} = 18.70 \text{ Kg/Kmol}$$

$$R=0.082 \text{ L atm/mol K}^{\circ}$$

$$\rho_{GN} = 1.83 \text{ kg/m}^3$$

- **Calcul de la vitesse superficielle U_1 à travers le lit :**

On utilise l'équation suivant pour calcul U_1

$$U_1 = M_g / (60 * S * \rho_{GN})$$

Avec

$$S = 5.411 \text{ ft}^2 \quad (\text{Voir Annexe 07})$$

$$\rho_{GN} = 1.83 \text{ kg/m}^3 = 0.11 \text{ Lb/ft}^3$$

$$M_g = 2132 \text{ Nm}^3/\text{h} = 3.9 * 10^3 \text{ Lb/h}$$

$$U_1 = 109.2 \text{ ft/min}$$

Pour calcul de la perte de charge $\Delta P/L_1$ en utilise l'équation (13) :

$$A=0.0561 \quad B=0.0000889$$

$$\mu_1 = 0.02 \text{ Cp} \quad (\text{Voir Annexes 8})$$

$$\Delta P/L_1 = 0.239 \text{ psi/ft}$$

✓ **Calcul du nombre de Reynolds Re_1**

D'après l'équation (14) on calcul du nombre de reynolds

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

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

$$G = 680 \text{ Lb/ft}^2 \text{ h}$$

$$Re_1 = 158.14$$

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

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

Pour calcul le $\Delta P/L_2$, il faut d'abord calcul la masse volumique de GN et la vitesse superficielle , à l'aide de l'équation suivante

Le gaz naturel de refroidissement:

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

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

- Calcul la masse volumique de GN est calculé a partir l'équation (y)

$$M_{GN} = 18.70 \text{ Kg/Kmol}$$

$$R=0.082 \text{ L atm/mol K}^{\circ}$$

$$\rho_{GN} = 3.54 \text{ kg/m}^3$$

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

On utilise l'équation suivant pour calcul U_2

$$U_2 = M_g / (60 * S * \rho_{GN})$$

$$S = 5.411 \text{ ft}^2 \text{ (Voir Annexe 07)}$$

$$M_g = 1.31 * 10^3 \text{ Lb/h}$$

$$U_2 = 18.34 \text{ ft/min}$$

Pour calcul de la perte de charge $\Delta P/L_2$ en utilise l'équation (13)

Avec : $\mu_2 = 0.01 \text{ Cp}$ (Voir Annexes 8)

$$\Delta P/L_2 = 0.016 \text{ Psi/ft}$$

✓ Calcul du nombre de Reynolds Re

D'après l'équation (14) on calcul Re

On obtient

$$Re_2 = 80.5$$

➤ Récapitulation des résultats

À la suite de l'application de la procédure de calcul définie, préalablement les résultats obtenus sont regroupés dans le **tableau III.6.**

Tableau III.6. Représentation des résultats cas design et cas de calcule actuel

Les valeurs de design	Les valeurs calculées
$D = 2.10 \text{ m}$	$D = 2.10 \text{ m}$
$M_r = 4653 \text{ Kg}$	$M_r = 3993 \text{ Kg}$
$0.15 * 10^6 < H_r < 3.3 * 10^6 \text{ Kcal /h}$	$H_r = 2.2 * 10^6 \text{ Kcal /h}$
$t_r = 11 \text{ h}$	$T_r = 11 \text{ h}$

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

$t_{ref} = 5 \text{ h}$	$T_{ref} = 5 \text{ h}$
$1000 < \text{Débit} < 2500 \text{ Nm}^3/\text{h}$	$M = 779.09 \text{ Nm}^3/\text{h}$
$0.01 < \Delta P/L < 0.25 \text{ psi /ft}$	$\Delta P/L_1 = 0.239 \text{ psi /ft}$ $\Delta P/L_2 = 0.016 \text{ psi /ft}$
$Re > 100$	$Re_1 = 158.14$ $Re_2 = 80.5$
$t_{ads} = 36 \text{ h}$	$t_{ads} = 36.98 \text{ h}$

D'après le tableau III.6, on remarque effectivement que la quantité de chaleur produite par le four satisfait aux besoins du processus.

Les marges de conception étant respectées, nous pouvons maintenant utiliser notre méthode de calcul pour le premier cas d'étude, qui a une teneur en eau de 24ppm dans la charge.

III.6. Étude des solutions

III.6.1. Étude de la prolongation de la durée d'adsorption (Étude de la première solution) [24]

Pour optimiser le temps d'adsorption, nous calculons le temps pour une concentration de 24 ppm.

III.6.1.1. Calcul de débit d'eau

Débit d'eau est calculée à partir l'équation (19)

$$q_w = 0,188 \text{ (Lb/ft}^2\text{.h)}.$$

Y in : la teneur en eau dans la charge de GPL , Y in = 24 ppm.

Nous remarquons une diminution du débit d'eau **0.188 Lb/ft².h** par rapport au débit d'eau précédemment calculé **0.77 Lb/ft².h**, et cela est dû au pourcentage de diminution de la teneur en eau dans la charge .

III.6.1.2. Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse

A partir l'équation (20) ,on a calculé H_z

$$H_z = 1.029 \text{ ft} = 0.31 \text{ m}$$

III.6.1.3. Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre

Le calcul de H_i est effectué par la relation (21).

Avec :

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

H_t : la hauteur total du lit ($H_t = 1.8 \text{ m} = 5.9 \text{ ft}^3$). (Voir annexes 2).

$$H_s = 4.871 \text{ ft} = 1.49 \text{ m}$$

III.6.1.4. Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads}

M_{ads} est calculée comme suit

$$M_{ads} = ((H_s - (C * H_z)) * (X_s * D^2 * \rho_{tamis})) / 127.38$$

C : Constante relative aux tamis moléculaire.

ρ_{tamis} : Masse volumique du tamis

XS : la capacité d'adsorption à l'équilibre neuf à 25°C, XS =22 % en poids (voir l'annexes 2).

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

$$M_{ads} = 809.073 \text{ Lb}$$

III.6.1.5. Calcul du temps d'adsorption

En peut utiliser la formule suivante: $t_{ads} = 0.01 * X * H_t * \rho_{tamis} / q_w$

$$t_{ads} = 163.02 \text{ h}$$

III.6.1.6. Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessinant (X)

A partir l'équation (22) , on calcul X

$$X = 12.98 \text{ Lb d'eau / 100 Lb de dessinant}$$

III.6.1.7. Détermination de l'efficacité d'adsorption

$$\text{Eff} = X / X_s \longrightarrow \text{EFF} = 90.45$$

A. Calcul du bilan énergétique [24]

Pour assurer le calcul du billan énergétique il faux établir ces calculs

A.1. Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}

La quantité d'eau adsorbée $M_{ads} = 809.07 \text{ Lb}$.

La chaleur de désorption $\Delta H = 1800 \text{ BTU/Lb}$. (Voir annexes 2).

D'après l'équation (7) :

$$Q_{des} = 1.45 * 10^6 \text{ BTU}$$

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

A.2. Calcul des pertes de chaleur Q_{perte}

Q_{perte} est calculé, d'après l'équation (5)

$$Q_{\text{perte}} = 3.09 \cdot 10^5 \text{ BTU}$$

A.3. Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale} [24]

À partir de l'équation (1), on calcule Q_{totale}

$$Q_{\text{totale}} = 3.4008 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

A.4. Calcul de la chaleur fournie par le four H_f [27]

D'après l'équation (7), on calcule H_f

$$H_f = 1.13 \cdot 10^7 \text{ BTU / h}$$

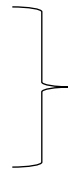
A.5. Calcul du temps de réchauffage du tamis t_r

Temps de réchauffage du tamis est déterminé, d'après l'équation (8).

$$H_f = 1.13 \cdot 10^7 \text{ BTU / h.}$$

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

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



$$t_r = 11 \text{ h}$$

A.6. Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle $H_{F/CYCLE}$ [24]

La chaleur fournie par le four par cycle $H_{F/CYCLE}$ est calculée

Par l'équation (9)

$$H_{F/CYCLE} = 7.6 \cdot 10^5 \text{ BTU/h}$$

Avec :

$$t_r = 11 \text{ h.}$$

$$H_f = 1.13 \cdot 10^7 \text{ BTU / h.}$$

$$t_{\text{ads}} = 163.02 \text{ h.}$$

A.7. Calcul du temps de refroidissement du tamis

Temps de refroidissement du tamis est calculée,

D'après l'équation (10) : $t_{\text{ref}} = 5 \text{ h}$

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

A.8. Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref} [24]

D'après l'équation (11), on calcul Q_{ref}

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

$$Q_{tamis} = 6.118 \cdot 10^5 \text{ BTU} .$$



$$Q_{ref} = 3.28 \cdot 10^5 \text{ BTU/h}$$

A. Calcul du bilan de matière de la régénération

Pour assurer le calcul du bilan de matière il faut établir ces calcul

B.1. Calcul du débit du gaz de refroidissement [24]

D'après l'équation (12), on calcul M_{ref}

$$M_{ref} = 646.94 \text{ Nm}^3/\text{h} .$$

✚ Calcul des pertes de charges

✚ Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_1$ pour le GN chaud [24]

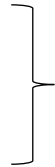
Pour assurer le calcul de la perte de charge pour GN chaud il faut établir ces calcul

✓ Calcul de la vitesse superficielle U_1 à travers le lit

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

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

$$M_g = 3.68 \cdot 10^3 \text{ Lb} / \text{h} .$$



$$U_1 = M_g / (60 \cdot S \cdot \rho_{GN})$$

$$U_1 = 103.06 \text{ ft} / \text{min} .$$

Pour calculer $\Delta P/L_1$ on utilise la formule (13) :

$$U_1 = 103.06 \text{ ft} / \text{min}$$

$$\mu_1 = 0.02 C_P . (\text{Voir Annexe 5})$$

$$A = 0.0561, B = 0.0000889$$

$$\Delta P/L_1 = 0.219 \text{ psi} / \text{ft} .$$

✚ Calcul de Re_1

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

$$\mu_1 = 0.02 C_P = 0.04 \text{ Lb} / \text{ft} \cdot \text{h} . (\text{Voir annexes 5}) .$$

$$G = 680 \text{ Lb} / \text{ft}^2 \cdot \text{hr} .$$

D'après l'équation (14) : $Re_1 = 170 .$

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

✚ Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_2$ pour le GN froid [24]

Pour assurer le calcul de la perte de charge pour GN froid il faut établir ces calcul

✓ Calcul de la vitesse superficielle U_2 à travers le lit

$$\left. \begin{array}{l} S = 5.41 \text{ ft}^2 . \\ \rho_{GN} = 0.24 \text{ Lb / ft}^3 . \\ M_g = 1.3 \cdot 10^3 \text{ Lb / h} . \end{array} \right\} \begin{array}{l} U_2 = M_g / (60 \cdot S \cdot \rho_{GN}) \\ U_2 = \mathbf{16.687 \text{ ft / min.}} \end{array}$$

Pour calculer $\Delta P/L_2$ on utilise la formule (13) :

$$\mu_2 = 0.01 \text{ CP} . (\text{Voir Annexe 5}) \qquad \Delta P/L_2 = \mathbf{0.015 \text{ psi / ft} .}$$

✚ Calcul de Re_2

D'après l'équation (14) : $\mathbf{Re_2 = 80.1}$

$\mu_2 = 0.01 \text{ CP} = 0.03 \text{ Lb / ft. h.}$ (Voir annexes 5).

➤ Interprétation des résultats

Nous concluons à partir des résultats obtenus que nous avons atteint notre objectif de travail en modifiant augmentant le temps d'absorption du sécheur de charge, qui est passé de (36 h (le temps de design) à 163.02h (le temps obtenu après les calculs)).

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

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

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

III.6.2. Étude de la réduction de la durée de régénération (réchauffage) (Étude de la deuxième solution)

Dans ce cas nous avons basée sur l'optimisation des paramètres de régénération sans modifier le temps d'adsorption (36h).

III.6.2.1. Calcul le débit d'eau

Donne par la formule (19), on calcule le débit d'eau

$$q_w = 0,188 \text{ (Lb/ft}^2\text{.h)}.$$

III.6.2.2. Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse [24]

A partir l'équation (20), on calcul de H_z

$$H_z = 1.029 \text{ ft} = 0.31 \text{ m}$$

III.6.2.3. Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre

A partir l'équation (21), on calcul de H_s

$$H_s = 4.871 \text{ ft} = 1.49 \text{ m}$$

III.6.2.4. Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads}

A partir l'équation (23), on calcul de la quantité d'eau adsorbée

Avec ; $t_{ads}=36h$

$$M_{ads} = 241.13 \text{ Lb}$$

III.6.2.5. Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessinant (X)

A partir l'équation (22), on calcul X

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

$$X = 12.98 \text{ Lb d'eau / 100 Lb de dessinant}$$

III.6.2.6. Détermination de l'efficacité d'adsorption

L'efficacité d'adsorption est calculée par suit

$$\text{Eff} = X / X_s \quad \longrightarrow \quad \text{EFF} = 90.45$$

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

A. Calcul du bilan thermique [25]

Pour assurer le calcul du bilan thermique il faut établir ces calculs

A.1 Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}

La quantité d'eau adsorbée $M_{ads} = 241.13$ Lb.

D'après l'équation (2), calcul de Q_{des}

$$Q_{des} = 4.3 * 10^5 \text{ BTU}$$

A.2. Calcul des pertes de chaleur Q_{perte}

D'après l'équation (5), on calcule Q_{perte}

$$Q_{perte} = 2.5 * 10^5 \text{ BTU}$$

A.3. Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale} [25]

Q_{totale} est calculée, d'après l'équation (1)

$$Q_{totale} = 2.32 * 10^6 \text{ BTU}$$

A.4. Calcul de la chaleur fournie par le four H_f [27]

D'après l'équation (7), on calcule H_f

$$H_f = 6.1 * 10^6 \text{ BTU}$$

A.5. Calcul du temps de réchauffage du tamis t_r [27]

D'après l'équation (8), on calcule t_r

$$t_r = 6.01 \text{ h}$$

A.6. Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle $H_{F/CYCLE}$ [24]

$H_{f/cycle}$ est calculée, d'après l'équation (9)

$$H_{F/CYCLE} = 1.02 * 10^6 \text{ BTU}$$

A.7. Calcul du temps de refroidissement du tamis t_{ref}

D'après l'équation (10), on calcule t_{ref}

$$t_{ref} = 4.25 \text{ h}$$

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

A.8. Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}

Q_{ref} est calculée, d'après l'équation (11)

$$Q_{ref}=3.86*10^5 \text{ BTU/h}$$

B. Calcul du bilan de matière de la régénération [24]

Pour assurer le calcul du bilan de matière il faut établir ces calculs

B.1. Calcul du débit du gaz de refroidissement

D'après l'équation (12), on calcul M_{ref}

$$Q_{ref} = 3.86*10^5 \text{ BTU/h.}$$

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

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

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

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

$$M_{ref}=761.43 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

➤ Interprétation des résultats

Enfin, nous remarquons une diminution du temps de chauffage jusqu'à 6 heures sans changement du temps d'adsorption de 36 heures

Cette modification entraîne une réduction moins conséquente de l'énergie produite par le four par cycle opérationnel, étant donné que la même quantité de gaz naturel est consommée pour un cycle d'adsorption de 36 heures que pour un cycle d'adsorption prolongé.

Lors de la phase d'adsorption, les dessicants se chargent d'humidité, atteignant à l'état d'équilibre une condition de saturation. Une fois saturé, le dessinant ne peut plus adsorber et doit être régénéré. Pendant cette régénération, l'humidité est évacuée par chauffage.

Cependant, dans notre situation où le lit n'est pas complètement saturé, le chauffage de la section sèche du lit devient superflu et peut entraîner une détérioration du tamis ainsi qu'une diminution de sa performance.

Chapitre III : Optimisation des paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge

III.7. Interprétation et choix de la solution optimale

Pour bien visualiser les résultats obtenus, on a regroupé dans le **Tableau III.7**, les calculs obtenus des deux solutions proposés.

Tableau III.7. Représentation des résultats obtenus de deux solution proposées.

Solution 1 : étude de la prolongation de la Durée d'adsorption. On fixe temps de réchauffage 11h	Solution 2 : étude de la réduction de la durée de réchauffage. On fixe temps adsorption 36h
Mads= 809.073Lb	Mads=241.13Lb
tads=163.02h	tads= 36h
tr=11h	tr=6.01h
Mref=646.94Nm ³ /h	Mref=761.43Nm ³ /h
Hf=1.13*10 ⁷ BTU/h	Hf=6.1*10 ⁶ BTU/h

Selon la totalité des données obtenues, l'optimisation du fonctionnement de la section de déshydratation de la charge par la réalisation de la solution idéale à la problématique posée, à savoir : l'augmentation de la durée d'adsorption du sécheur

Cette augmentation présente plus d'avantage pour le système, car elle réduira le nombre de cycles par mois, avec une diminution de nombre de régénération entraînant :

1. Une réduction de la consommation de gaz naturel pendant la régénération du cycle de refroidissement.
 2. Une réduction de la chaleur apportée par le four durant la séquence de chauffage, estimation basée sur une saturation complète du lit, car si on chauffe un lit qui n'est que partiellement rempli d'eau, l'énergie utilisée pour chauffer un tamis sans eau est tout simplement perdue.
 3. Un allongement de la longévité du tamis moléculaire.
 4. Une diminution moindre lors de la régénération du produit GPL retenu dans le tamis moléculaire.
 5. Amélioration de l'efficacité du tamis due à la réduction de la dégradation des cristaux.
- De plus, la réalisation de cette idée ne nécessite aucun investissement.

Conclusion générale.

Ce travail de recherche a été entrepris dans le cadre d'une convention entre le département de génie des procédés de l'Université de Mostaganem et le Complexe GP1/Z. Cette expérience nous a permis d'acquérir de nouvelles compétences techniques, tout en renforçant notre sens de l'observation et notre capacité à travailler en équipe

Le traitement du gaz naturel au niveau de la section de déshydratation du complexe GP1/Z a pour objectif principal de réduire la teneur en eau dans l'alimentation, en la faisant passer d'une valeur maximale de 100 ppm à environ 5 ppm à la sortie des sécheurs, afin de garantir la qualité du gaz traité et d'assurer une protection optimale et durable des équipements contre les risques potentiels de corrosion et de formation d'hydrates

Cependant, l'exploitation actuelle des tamis moléculaires montre que la charge alimentant les sécheurs présente une teneur en eau inférieure à 25 ppm, sans adaptation des paramètres opératoires qui sont initialement prévus pour les conditions de design. Dans ce contexte, et sur proposition des responsables d'exploitation, cette étude a été menée dans le but d'optimiser les paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation, particulièrement au niveau des sécheurs par deux solutions .

Les résultats obtenus ont permis d'examiner deux solutions d'optimisation qui présente des effets significatifs sur les performances de l'unité. La première solution consiste à augmenter le temps d'adsorption de 36 heures à environ 163 heures, en tenant compte de la teneur réelle en eau dans la charge. Cette modification permet de réduire le nombre de cycles de régénération, ce qui conduit à une diminution de la consommation énergétique, notamment du gaz naturel utilisé lors du chauffage

La deuxième solution repose sur l'optimisation de la durée de régénération, en particulier la durée de chauffage, afin d'améliorer l'efficacité énergétique de l'unité tout en maintenant les performances de déshydratation exigées

En outre, les deux solutions proposées permettent également d'obtenir plusieurs avantages supplémentaires tel que :

- La réduction de la fréquence des régénérations contribue à limiter l'exposition des tamis moléculaires aux températures élevées, principal facteur de leur dégradation par formation de coke.
- 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.

Enfin, cette étude a montré que l'optimisation des paramètres opératoires de la section de déshydratation constitue une solution efficace pour réduire la consommation énergétique, améliorer la fiabilité des équipements et prolonger leur durée de service. Les résultats obtenus ouvrent également des perspectives intéressantes pour de futures études visant à approfondir l'analyse technico-économique et à développer des stratégies d'exploitation encore plus performantes au niveau du complexe GP1/Z.

Bibliographies

Bibliographies

- [1] Manuel opératoire ; process : volume 1 et 2. Document GP1/Z.
- [2] P.Wuithier, Raffinage et génie Chimique, TOME 1, Edition Tech. Paris 1972.
- [3] J. P. Wauquier, procedes de separation, Tome II, Edition Techniq, 1998.
- [4] GPSA Engineering Data Book Volume (I) & (II) Twelfth Edition (2004).
- [5] Roy A. Parisher-Robert A. Rhea Pipe drafting and design – (second edition).
- [6] F-Ztalatikite, sumposium binnal 1997.volume I.
- [7] Dr.A. H Younger Natural gas Processing Principles and Technology-partII.April2004-
- [8] Catalogue Mécanique "Tuyauterie" volume 19.Document GP1/Z.
- [9]. www.ace.mmu.ac.uk/eae/french/GlobalWarming/Older/ClimateChange.html.
- www.ec.gc/energ/oilgas/flaring/flaring_exesumm_f.mate.htm consulté le 01 mai 2026 .
- [10]. Manuel Opérateur GP1/Z, Stockage de la charge, Section 1, Volume 2.
- [11].Gouvernement du Québec, les effluents liquides du secteur des raffineries de pétrole, Bilan de conformité environnementale de (2011) .
- [12]Algerian petrolum institue Ipa Spa.
- [13] Manuel Opérateur GP1/Z, Utilités, Section 7, Volume 1.
- [14] Manuel Opérateur GP1/Z, Process, Section 2, Volume 4.
- [15] Catalogue mécanique, Section 4 Volume 1 et 2.
- [18] Déshydratation Bloc 11, module 3.
- [19] www.fremer.fr/exploitation/en_jeux/hydrates/index.htm a la Découvertes des grands Fonds consulté le 01 mai 2026.
- [20] Coulson and richrdson's. chemical engineering, particles technologies and separation process. fifth edition, volume 2. Butter Worth heinemann, 2002.

[21] Etude de l'effet de changement du diamètre des tamis moléculaires sur le système de séchage (Unité Gla / Hbk).

[22]. Kohl et Richard - Gas Purification, 5^e édition, Gulf Publishing company, 1997.

[23]. A. Rojey ; le gaz naturel, production- traitement – transport .

[24] ARBI Bouziane, Mémoire de fin de formation de professionnalisation en Génie de gaz, Optimisation du fonctionnement de la section Déshydratation de charge au niveau de complexe GP1/Z (2018).

[25] Manuel opératoire ; section déshydratation. Document GP1/Z.

[26] Document GP1/Z, Typical physical propriétés de Tamis Moléculaire.

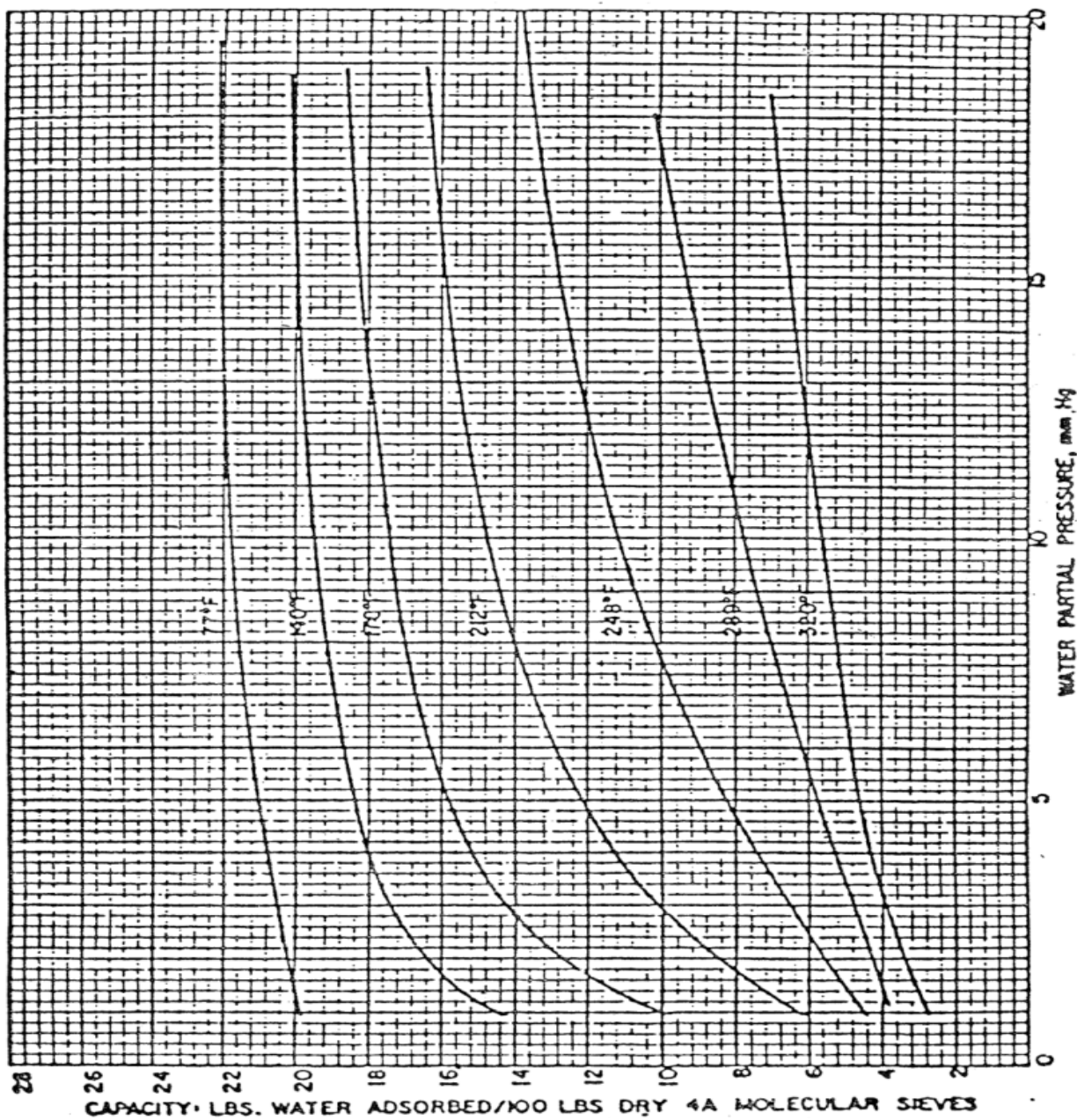
[27] HAMADOUCHE Djamel, Optimisation du fonctionnement de la section Déshydratation du complexe GP1/Z (2010).

ANNEX

ANNEX 1

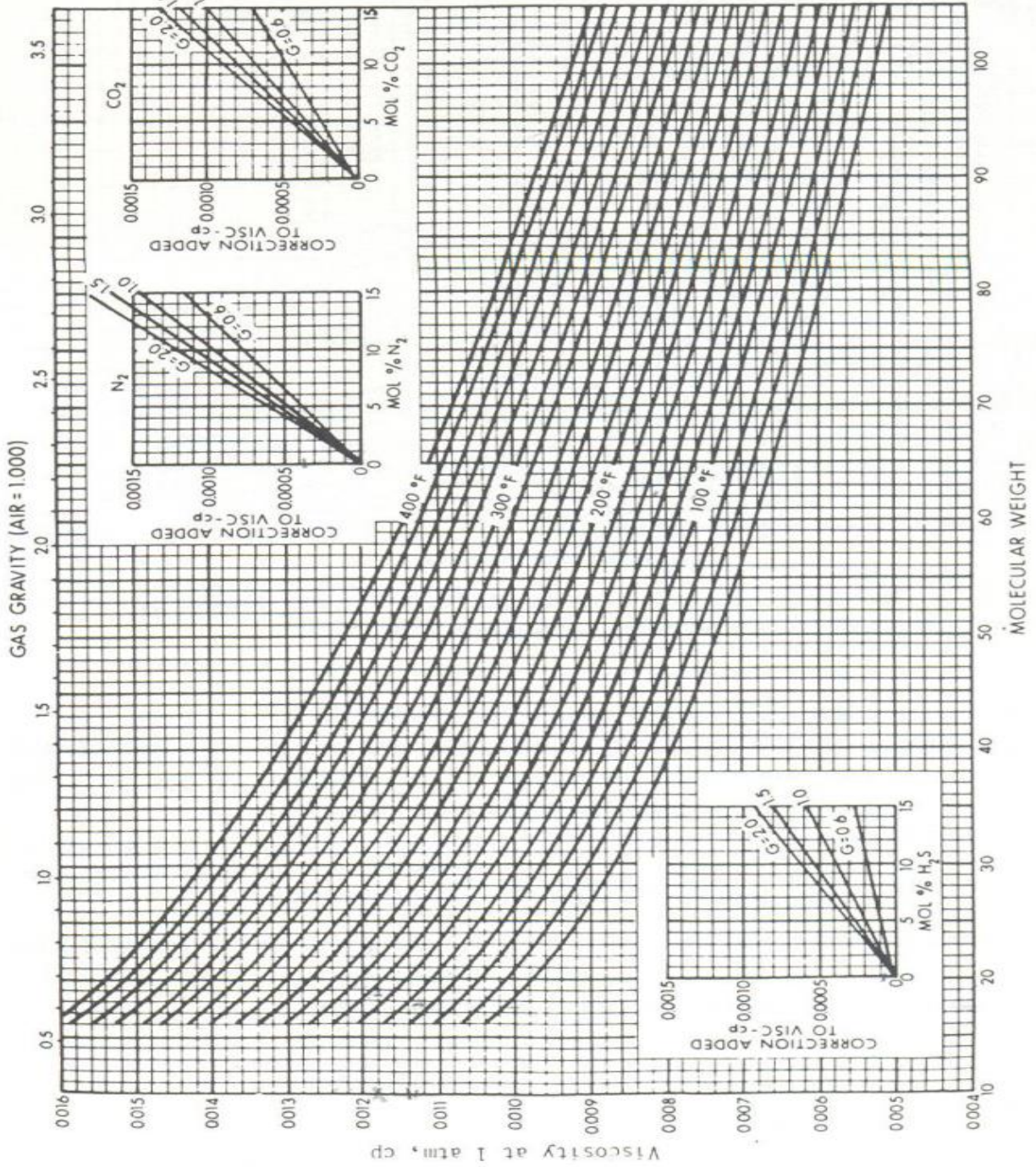
4A MOLECULAR SIEVES

15



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

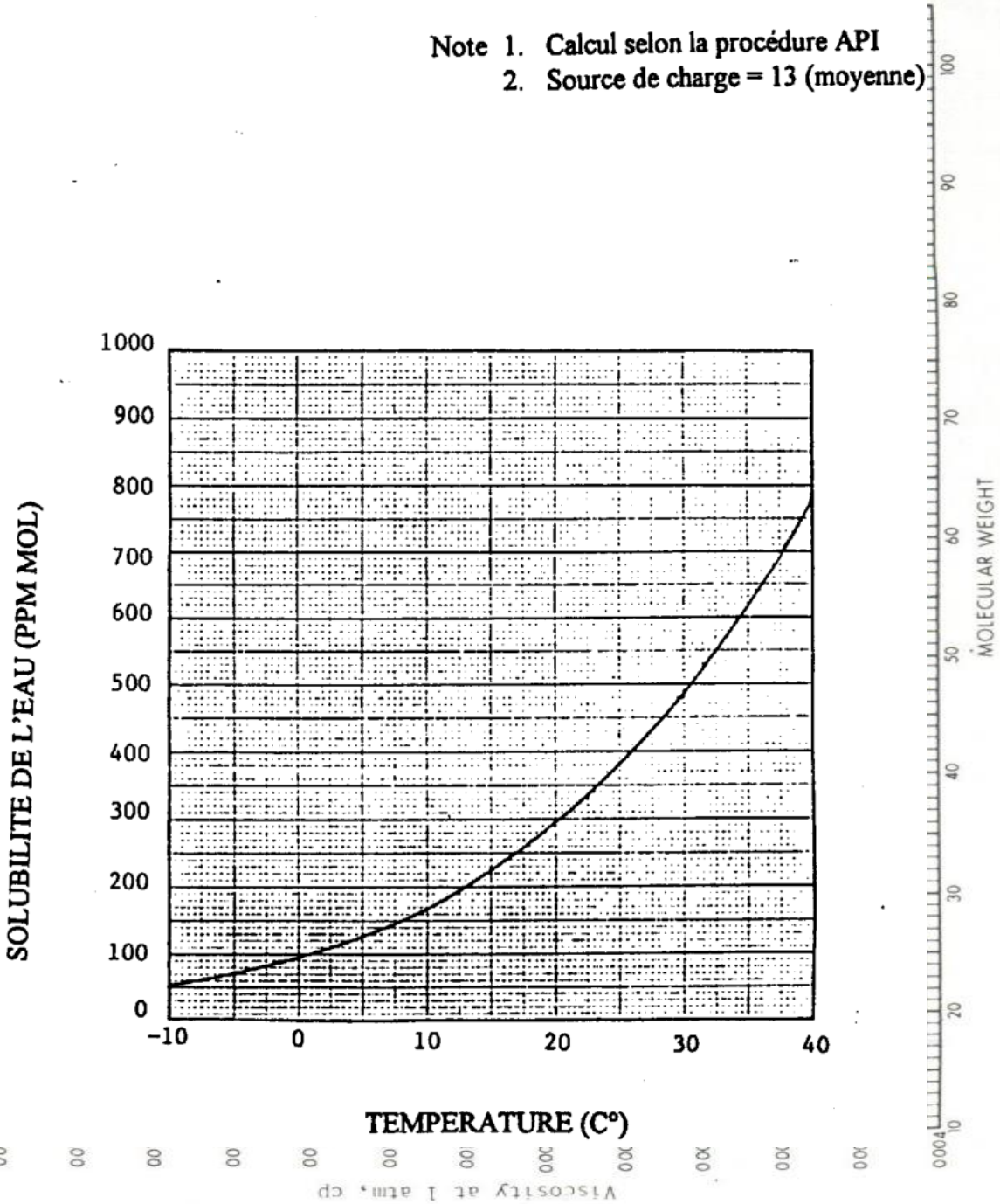
ANNEX 2



ANNEX 3

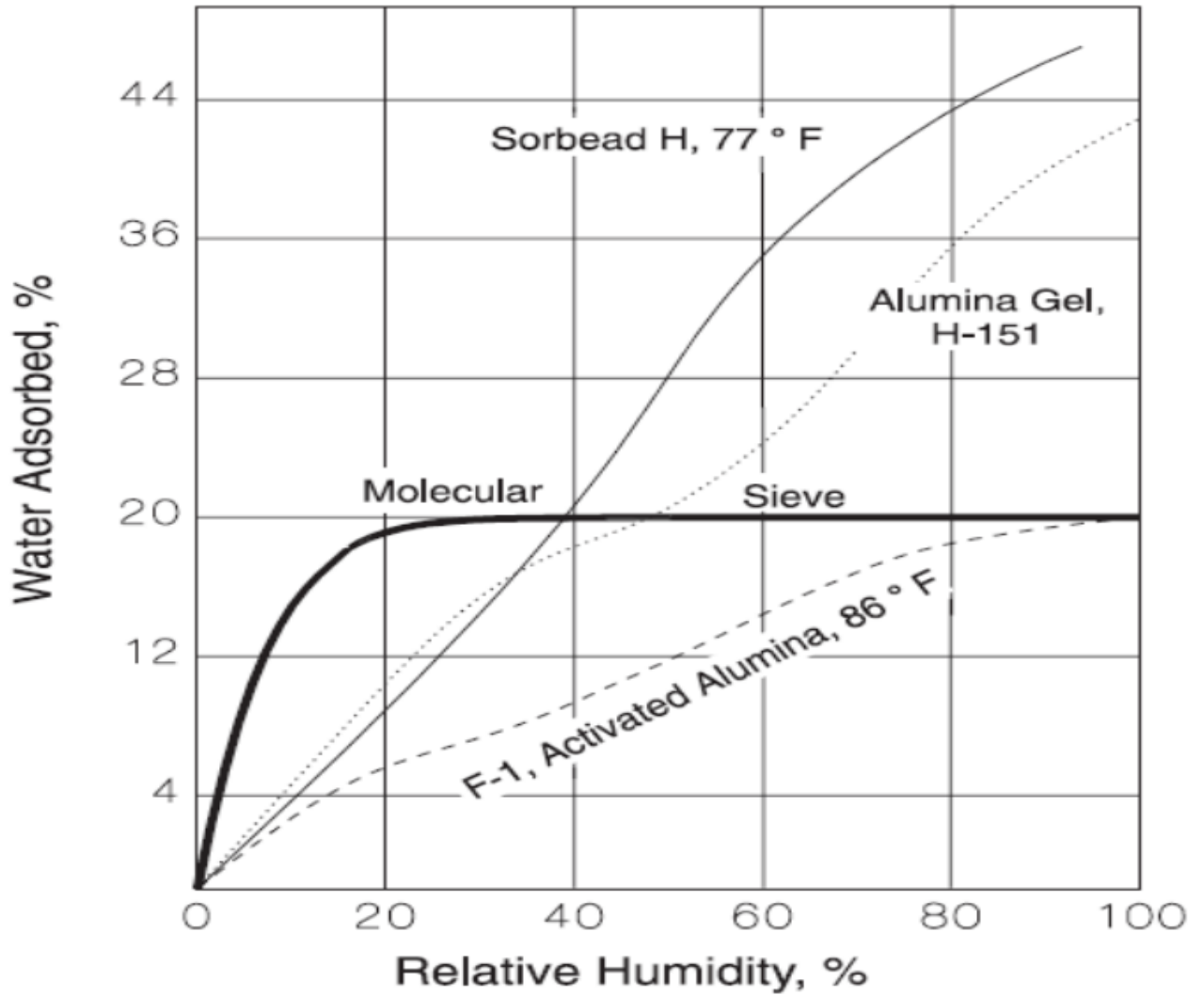
SOLUBILITE DE L'EAU DANS LA CHARGE DE GPL

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



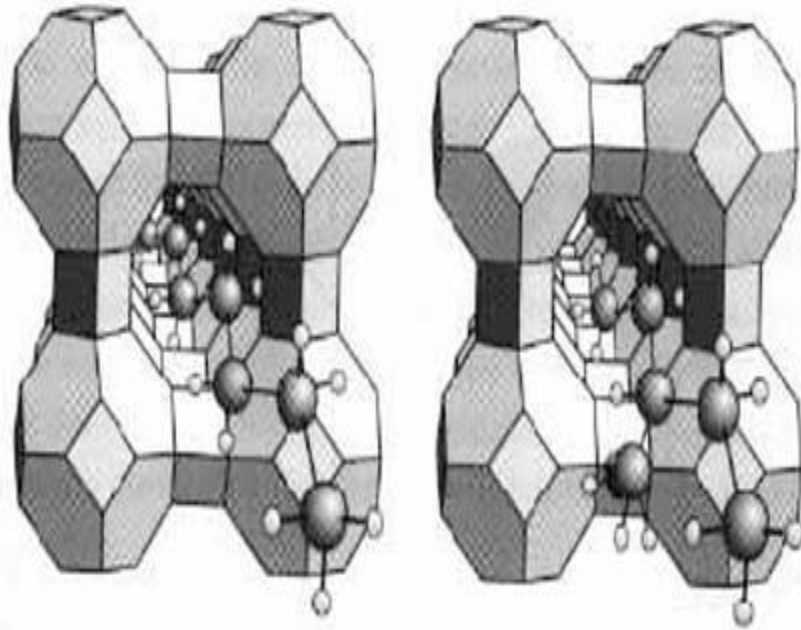
ANNEX 4

Static Equilibrium Capacity vs. Relative Humidity for Selected Solid Desiccants⁴³



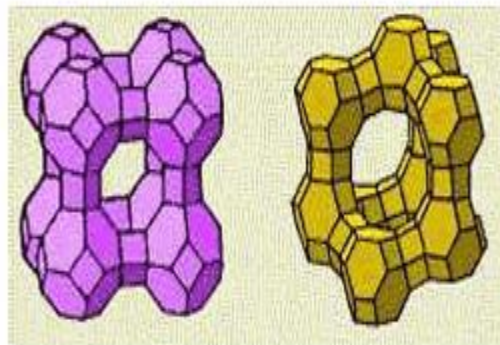
ANNEX 6

Tamis moléculaires



Structure de zéolithe de type A

Structure de zéolithe de type X



ANNEX 7

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 ⁹	D x 10 ⁶	E x 10 ⁶	F x 10 ⁹	G	Intervalle °C
<i>Non-Hydrocarbonés</i>									
1	Oxygène	-2,283574	0,952440	-0,281140	0,655223	-0,452316	1,087744	2,080310	-175 to 1200
2	Hydrogène	28,671997	13,396156	2,960131	-3,980744	2,661667	-6,099863	-11,801371	-175 to 1200
3	Eau	-5,729915	1,915007	-0,395741	0,876232	-0,495086	1,038613	0,702815	-175 to 1200
4	Sulfure d'hydrogène	-1,437049	0,998865	-0,184315	0,557087	-0,317734	0,636644	1,394812	-175 to 1200
5	Azote	-2,172507	1,068490	-0,134096	0,215569	-0,078632	0,069850	1,805409	-175 to 1200
6	Ammoniac	-2,202606	2,010317	-0,650061	2,373264	-1,597595	3,761739	0,990447	-175 to 1200
7	Carbone	9,572700	-0,199901	1,535456	0,267516	-0,811532	2,726889	1,687611	-175 to 1200
8	Monoxyde de carbone	-2,269176	1,074015	-0,172664	0,302237	-0,137533	0,200365	2,018445	-175 to 1200
9	Dioxyde de carbone	11,113744	0,479107	0,762159	-0,359392	0,084744	-0,057752	2,719180	-175 to 1200
10	Dioxyde de soufre	3,243188	0,461650	0,248915	0,120900	-0,188780	0,568232	2,086924	-175 to 1200
<i>Paraffines</i>									
11	Méthane	-16,228549	2,393594	-2,218007	5,740220	-3,727905	8,549685	-0,339779	-175 to 1200
12	Ethane	-0,049334	1,108992	-0,188512	3,965580	-3,140209	8,008187	1,995889	-175 to 1200
13	Propane	-1,717565	0,722648	0,708716	2,923895	-2,615071	7,000545	2,289659	-175 to 1200
14	n-Butane	17,283134	0,412696	2,028601	0,702953	-1,025871	2,883394	2,714861	-75 to 1200
15	2-Méthylpropane	26,744208	0,195448	2,523143	0,195651	-0,772615	2,386087	3,466595	-75 to 1200
16	n-Pentane	63,201677	-0,011701	3,316498	-1,170510	0,199648	-0,086652	4,075275	-20 to 1200
17	2-Méthylbutane	64,252075	-0,131900	3,541156	-1,333225	0,251463	-0,129589	4,572976	-20 to 1200
18	2,2-Diméthylpropane	27,380416	0,018305	3,063221	-0,375030	-0,530964	2,059134	3,388342	-75 to 1200
19	n-Hexane	-17,191071	0,959226	-0,614725	6,142101	-6,160952	20,868190	-0,207040	-75 to 700
20	2-Méthylpentane	33,798408	0,173685	2,348998	0,844100	-1,559115	5,534684	2,968423	-75 to 700
21	3-Méthylpentane	17,964768	0,397799	1,209870	3,254556	-3,942661	14,384148	2,149541	-75 to 700
22	2,2-Diméthylbutane	92,706801	-0,500323	4,525783	-2,415290	0,713199	-0,591097	5,617113	-20 to 700
23	n-Heptane	-0,153725	0,754499	0,261728	4,366358	-4,484510	14,842099	0,380048	-75 to 700
24	2-Méthylhexane	17,893709	0,404849	1,334653	2,877698	-3,511818	12,540055	1,823456	-75 to 700
25	3-Méthylhexane	36,807299	0,167431	2,262250	1,067097	-1,781538	6,169491	2,864993	-75 to 700
26	2,4-Diméthylpentane	11,508769	0,093303	2,598254	0,630349	1,428307	4,569218	2,847131	-20 to 700
27	n-Octane	2,604725	0,724670	0,367845	4,142833	-4,240199	13,734055	0,327588	-75 to 700
28	2,2-Diméthylhexane	21,451302	0,226073	2,074483	1,466277	-2,169048	7,742088	2,139163	-20 to 700
29	2-Méthylheptane	27,405630	0,305110	1,826883	1,744174	-2,311344	7,752627	2,038844	-75 to 700
30	2,2,4-Triméthylpentane	26,118096	0,039675	2,742294	0,328610	-1,206014	4,586420	2,846608	-75 to 700
31	n-Nonane	4,000278	0,707805	0,438048	3,969342	-4,043158	12,876028	0,257265	-75 to 700
32	n-Décane	-6,962020	0,851375	-0,263041	5,521816	-5,631733	18,885443	-0,412446	-75 to 700
33	n-Undécane	65,290564	-0,099827	3,472495	-1,354336	0,264721	-0,145574	3,407959	-20 to 1200
34	m-Dodécane	60,967391	-0,077548	3,420649	-1,308559	0,247576	-0,130380	3,227042	-20 to 1200
35	n-Tridécane	62,748642	-0,096018	3,463033	-1,353243	0,264564	-0,145439	3,245905	-20 to 1200
36	n-Tétradécane	61,655096	-0,092312	3,452192	-1,345181	0,261574	-0,143007	3,172971	-20 to 1200
37	n-Pentadécane	62,217244	-0,100961	3,472075	-1,366935	0,269684	-0,150082	3,163060	-20 to 1200
38	n-Hexadécane	60,927011	-0,095563	3,459313	-1,356807	0,265935	-0,146753	3,095128	-20 to 1200
39	n-Heptadécane	60,853132	-0,098655	3,465969	-1,365537	0,269340	-0,149768	3,071276	-20 to 1200
40	n-Octadécane	60,419501	-0,098876	3,466295	-1,367430	0,270024	-0,150334	3,038272	-20 to 1200
41	n-Nonadécane	59,195816	-0,092752	3,451465	-1,354690	0,265281	-0,146249	2,979932	-20 to 1200
42	n-Eicosane	59,163624	-0,095147	3,456592	-1,360776	0,267410	-0,147933	2,963523	-20 to 1200

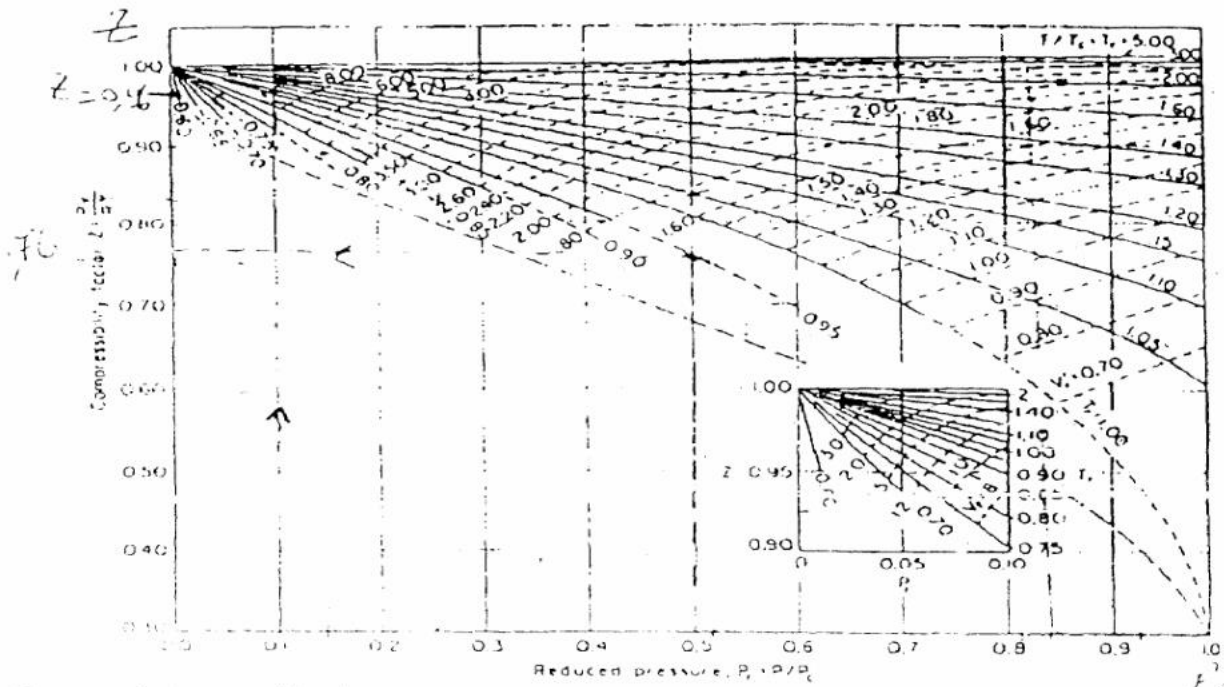
H = 0 kJ/kg pour le gaz parfait à 0 K.

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

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

Coefficient de l'équation d'enthalpie H°

ANNEX 8



Y2a - General of compressibility charts

$$\frac{v}{v_r} = \frac{Z}{Z_r}$$

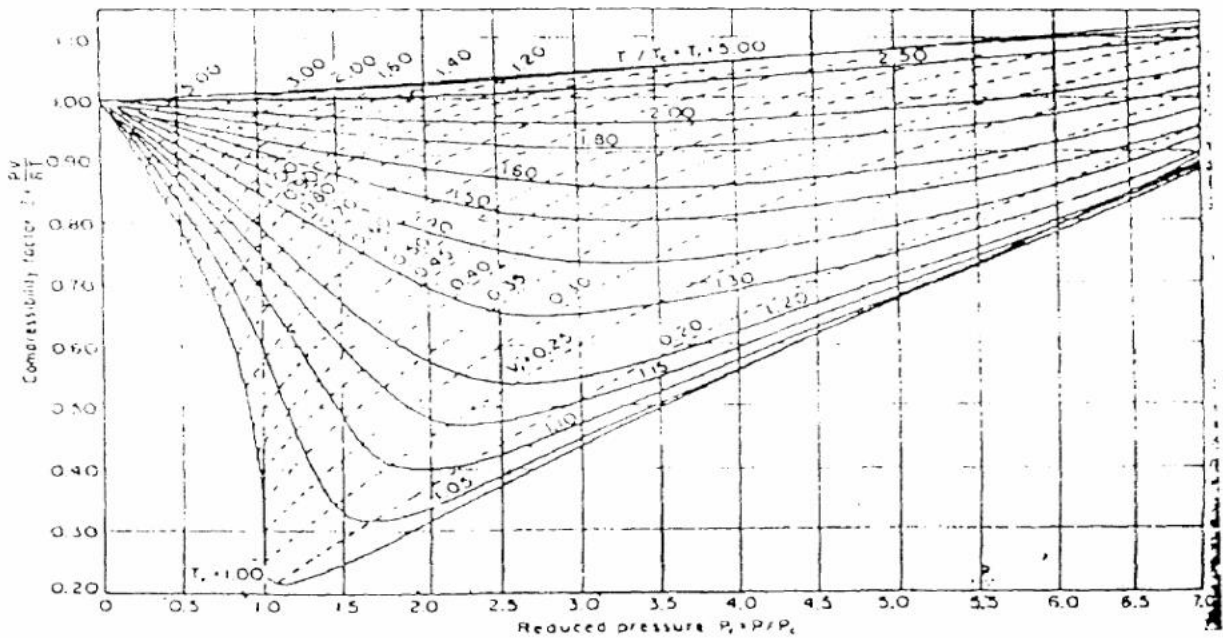


Figure VI- Détermination du coefficient de compressibilité Z.

ANNEX 9

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

PHYSICAL CONSTANTS

*See the Table of Notes and References.

Number	See Note No. → Compound	Formula	A.				C.		D.			Number
			Molar mass (molecular weight)	Boiling point, °F 14.696 psia	Vapor pressure, psia 100 °F	Freezing point, °F 14.696 psia	Refractive index, n _D 60 °F	Critical constants				
								Pressure, psia	Temperature, °F	Volume, ft ³ /lb		
1	Methane	CH ₄	16.043	-258.72	(5000)*	-296.41 *	1.00041*	667.0	-116.66	0.0988	1	
2	Ethane	C ₂ H ₆	30.070	-127.46	(800)*	-297.02*	1.20971*	707.8	90.07	0.0783	2	
3	Propane	C ₃ H ₈	44.097	-43.73	188.68	-305.72*	1.29480*	615.0	205.92	0.0727	3	
4	Isobutane	C ₄ H ₁₀	58.123	10.78	72.598	-255.26	1.3245*	527.9	274.41	0.0714	4	
5	n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.123	31.08	51.719	-217.03	1.33588*	548.8	305.51	0.0703	5	
6	Isopentane	C ₅ H ₁₂	72.150	82.09	20.450	-255.80	1.34771	490.4	368.96	0.0684	6	
7	n-Pentane	C ₅ H ₁₂	72.150	96.89	15.580	-201.48	1.35165	488.1	385.7	0.0695	7	
8	Neopentane	C ₅ H ₁₂	72.150	49.10	36.72	2.16	1.342*	464.0	321.01	0.0673	8	
9	n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.177	155.70	4.9614	-139.56	1.37708	439.5	451.8	0.0688	9	
10	2-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.177	140.44	6.769	-244.60	1.36571	436.6	435.76	0.0682	10	
11	3-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.177	145.86	6.103	-261.20	1.37090	452.5	448.2	0.0682	11	
12	Neohexane	C ₆ H ₁₄	86.177	121.50	9.859	-182.59	1.36283	446.7	419.92	0.0667	12	
13	2,3-Dimethylbutane	C ₆ H ₁₄	86.177	136.33	7.406	-199.35	1.36938	454.0	440.08	0.0665	13	
14	n-Heptane	C ₇ H ₁₆	100.204	209.07	1.6211	-130.99	1.38234	397.4	510.9	0.0682	14	
15	2-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	100.204	194.05	6.769	-244.60	1.37940	396.0	494.44	0.0673	15	
16	3-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	100.204	197.33	2.130	—	1.38326	407.6	503.62	0.0646	16	
17	3-Ethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	200.26	2.012	-181.44	1.38800	419.2	513.16	0.0665	17	
18	2,2-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	174.50	3.494	-190.80	1.37667	401.8	476.98	0.0665	18	
19	2,4-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	176.85	3.294	-182.59	1.37591	397.4	475.72	0.0667	19	
20	3,3-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	186.87	2.775	-209.99	1.38564	427.9	505.60	0.0662	20	
21	Triptane	C ₇ H ₁₆	100.204	177.54	3.376	-122.21	1.38411	427.9	496.24	0.0636	21	
22	n-Octane	C ₈ H ₁₈	114.231	258.17	0.5374	-70.17	1.39248	361.1	563.5	0.0673	22	
23	Diisobutyl	C ₈ H ₁₈	114.231	228.34	1.102	-132.09	1.38735	361.1	530.26	0.0676	23	
24	Isooctane	C ₈ H ₁₈	114.231	210.58	1.709	-161.23	1.38624	372.7	519.28	0.0657	24	
25	n-Nonane	C ₉ H ₂₀	128.258	303.40	0.1716	-64.26	1.40054	330.7	610.8	0.0693	25	
26	n-Decane	C ₁₀ H ₂₂	142.285	345.40	0.06091	-21.33	1.40720	304.6	652.2	0.0702	26	
27	Cyclopentane	C ₅ H ₁₀	70.134	120.60	9.917	-136.89	1.40050	653.8	461.1	0.0594	27	
28	Methylcyclopentane	C ₆ H ₁₂	84.161	161.29	4.491	-224.38	1.40400	548.8	499.28	0.0607	28	
29	Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	84.161	177.40	3.267	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	-154.71	(1400)*	-272.48*	(1.228)*	731.0	48.54	0.0746	31	
32	Propene(Propylene)	C ₃ H ₆	42.081	-53.83	232.8	-301.45*	1.3006*	676.6	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	-157.97	1.3487*	574.9	311.80	0.0679	35	
36	Isobutene	C ₄ H ₈	56.108	19.57	64.95	-220.60	1.3473*	580.2	292.49	0.0681	36	
37	1-Pentene	C ₅ H ₁₀	70.134	85.92	19.12	-265.37	1.36487	509.5	376.86	0.0674	37	
38	1,2-Butadiene	C ₄ H ₆	54.092	51.52	36.53	-213.14	—	(656.)*	(354.)*	(0.070)*	38	
39	1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	54.092	24.06	59.46	-164.00	1.3975*	620.3	306.	0.0653	39	
40	Isoprene	C ₅ H ₈	68.119	93.29	16.68	-230.71	1.41472	(582.)*	(403.)*	(0.066)*	40	
41	Acetylene	C ₂ H ₂	26.038	-119.21*	—	-113.4*	—	890.4	95.29	0.0693	41	
42	Benzene	C ₆ H ₆	78.114	176.13	3.225	41.96	1.49436	710.4	552.15	0.0531	42	
43	Toluene	C ₇ H ₈	92.141	231.08	1.033	-138.96	1.49102	595.5	605.50	0.0549	43	
44	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106.167	277.10	0.3716	-138.933	1.49022	523.0	651.22	0.0564	44	
45	o-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.167	291.91	0.2643	-13.32	1.50017	541.6	674.85	0.0557	45	
46	m-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.167	282.35	0.3265	-54.16	1.49177	512.9	650.95	0.0567	46	
47	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.167	280.98	0.3424	55.87	1.49039	509.2	649.47	0.0572	47	
48	Styrene	C ₈ H ₈	104.152	293.40	0.2582	-23.14	1.54937	587.8	(703.)*	0.0534	48	
49	Isopropylbenzene	C ₉ H ₁₂	120.194	306.27	(0.188)	-140.838	1.48607	465.4	676.2	0.0569	49	
50	Methyl alcohol	CH ₃ O	32.042	148.41	4.631	-143.77	1.32443	1174.	463.01	0.0590	50	
51	Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ O	46.069	172.87	2.313	-173.4	1.35717	891.7	465.31	0.0581	51	
52	Carbon monoxide	CO	28.010	-312.61	—	-336.99*	1.00028*	506.8	-220.51	0.0527	52	
53	Carbon dioxide	CO ₂	44.010	-109.235*	—	-69.81*	1.00038*	1069.5	87.73	0.0342	53	
54	Hydrogen sulfide	H ₂ S	34.082	-76.49	394.67	-121.86*	1.00057*	1300.	212.40	0.0461	54	
55	Sulfur dioxide	SO ₂	64.065	14.11	85.46	-103.84*	1.00059*	1143.	315.7	0.0305	55	
56	Ammonia	NH ₃	17.0305	-27.98	211.9	-107.85*	1.00033*	1647.	270.2	0.0681	56	
57	Air	N ₂ +O ₂	28.9625	-317.81	—	—	1.00028*	546.9	-221.30	0.0517	57	
58	Hydrogen	H ₂	2.0159	-423.130*	—	-434.824*	1.00013*	187.5*	-400.3*	0.5101*	58	
59	Oxygen	O ₂	31.9988	-297.317*	—	-361.826*	1.00027*	731.4	-181.41	0.0367	59	
60	Nitrogen	N ₂	28.0134	-320.436	—	-345.995*	1.00028*	492.8	-232.49	0.0510	60	
61	Chlorine	Cl ₂	70.9054	-29.12	157.3	-149.70*	1.3735*	1157.	290.69	0.0280	61	
62	Water	H ₂ O	18.0153	211.953*	0.95014	32.018	1.33335	3200.1	705.11	0.04975	62	
63	Helium	He	4.0026	-452.110	—	—	1.00003*	32.99	-450.31	0.2300	63	
64	Hydrogen chloride	HCl	36.4606	-121.25	906.71	-173.50*	1.00039*	1205.	124.75	0.0356	64	

9/15/95

Constantes critiques de pression et de température

ANNEX 10

