

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie des procédés



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :
Génie chimique

Intitulé

*Optimisation de fonctionnement de la section
Déshydratation du complexe $gp1/z$*

Présenté par :

- ❖ Mlle : *MECHAOUI HADJER*
- ❖ Mlle : *LARIBI AMINA*

Devant les membres de jury :

Président : Mr BABA AHMED Abderezzak
Encadreur : Mr Asli boubekour
Examineur : Mme RAHMANI Rachida

professeur A (U. Relizane)
Maître de conférence A (Tissemsilt)
Maître de conférence A (U. Relizane)

Année universitaire : 2024/2025



Dédicace

*Avant tout c'est grâce à dieu que nous sommes
Arrivées là.*

- *A mes très chers parents*

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

- *A mes très chers frères et sœurs*

Je vous souhaite une vie pleine de succès, de joie et de bonheur.

Que Dieu vous garde et illumine vos chemins.

- *A tous les membres de la famille grande et petite.*

- *A mes chères amies*

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





REMERCIEMENTS

Avant tout développement sur cette expérience il apparait opportun de commencer ce travail par des remerciements

Nous remercions Allah le Tout puissant et le bienveillant, de nous avoir accordés le succès, les bénédictions, la santé et surtout le courage d'accomplir ce travail et que sans lui nous ne serions pas là.

Nos vifs remerciements vont à nos parents qui ont participé à notre soutien tout au long de la période de préparation de ce mémoire

- A tous Ceux qui nous connaissent de près ou de loin sans cité leurs noms, sans oublie nos enseignants et nos camarades de la promotion de 2^{ème} master génie chimique.
- Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrant du mémoire **Mr B. ASLI** De l'Université de tissemsilt, pour son orientation, son l'encouragement et pour l'intérêt permanent qu'elle m'a manifesté tout au long de ce travail.
- Nous aimerions également remercier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre étude en acceptant d'examiner notre travail.

Nous dédions ce travail à tous ceux qui nous ont aidés pour l'obtention de ce diplôme sans aucune exception.

Nous tenons également à remercier notre superviseur du programme GP1/Z, le professeur **Chergui Abdelhamid**, pour son aide et son soutien durant la période de formation du PFE.

Nous tenons également tous les professeurs de la Faculté de Relizane, ainsi que tout le personnel du complexe GP1/Z d'Arzew pour leur coopération.

Nous tenons également le professeur **Chemrak Mohamed Amine** pour ses conseils, ses encouragements et son attention constante tout au long de ce projet.

Enfin nous ne saurons pas terminer sans mentionner ceux qui de près ou de loin ont contribué à notre réussite ; ainsi qu'envers l'ensemble du Jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Trouvez en ces mots notre profonde gratitude.

Résumé

Dans le cadre de la préparation de notre mémoire de fin de formation, nous avons été chargés d'un sujet intitulé : Optimisation de fonctionnement de la section déshydratation du complexe gp1/z. La présence d'eau dans le GPL peut engendrer des problèmes au niveau du traitement et du transport, tels que la formation d'hydrates, la corrosion ou l'obstruction des conduites. Pour éviter ces problèmes, différentes techniques de déshydratation sont mises en œuvre, notamment la déshydratation par adsorption utilisant des tamis moléculaires. Ce travail vise à optimiser la régénération des tamis moléculaires de la section de déshydratation du GPL, à travers l'optimisation du temps de cycle et de la masse de tamis utilisée, afin de garantir une meilleure exploitation et une durée de vie prolongée des tamis.

Mots clés : GPL, déshydratation, tamis moléculaire, déshydrateur, l'eau.

Abstract:

As part of our final dissertation preparation, we were tasked with a topic entitled: Optimizing the Operation of the Dehydration Section of the GP1/Z Complex. The presence of water in LPG can cause processing and transportation problems, such as hydrate formation, corrosion, or pipe blockages. To avoid these problems, various dehydration techniques are implemented, including adsorption dehydration using molecular sieves. This work aims to optimize the regeneration of molecular sieves in the LPG dehydration section by optimizing the cycle time and the sieve mass used, in order to ensure better operation and extended sieve life.

Keywords: LPG, dehydration, molecular sieve, dehydrator, water.

ملخص

كجزء من إعداد أطروحتنا النهائية، كُلفنا بموضوع بعنوان: تحسين تشغيل قسم التجفيف في مجمع GP1/Z. قد يُسبب وجود الماء في غاز البترول المسال مشاكل في المعالجة والنقل، مثل تكوّن الهيدرات، والتآكل، أو انسداد الأنابيب. ولتجنب هذه المشاكل، تُطبّق تقنيات تجفيف مُختلفة، بما في ذلك التجفيف بالامتزاز باستخدام المناخل الجزيئية. يهدف هذا العمل إلى تحسين تجديد المناخل الجزيئية في قسم تجفيف غاز البترول المسال من خلال تحسين زمن الدورة وكتلة الغريبال المُستخدمة، لضمان تشغيل أفضل وإطالة عُمر الغريبال.

الكلمات المفتاحية: غاز البترول المسال، التجفيف، الغريبال الجزيئي، جهاز التجفيف، الماء

Liste des figures

Figure I. 1 : Schéma de déshydrater.....	6
Figure I. 2 : Séquence de drainage.....	8
Figure I. 3 : Séquence de dépressurisation.....	9
Figure I. 4 : Séquence de chauffage.....	10
Figure I.5 : Profile de température de régénération.....	10
Figure I. 6 : Séquence de refroidissement.....	12
Figure I.7 : Séquence de pressurisation.....	13
Figure I. 8 : Séquence de remplissage.....	14
Figure II.1 : La zone ZMT se déplace lors de l'adsorption.....	21
Figure II.2 : La courbe de percée.....	22
Figure II.3 : Evolution de la concentration de l'adsorbant(fluide)au cours au l'adsorption.....	23
Figure II.4 : Tamis moléculaire sous ses diffèrent formes.....	26
Figure II.5 : Tamis moléculaire 3A et 4A.....	27
Figure III. 1 : La variation de la teneur en eau durant le moi Mars2024.....	38
Figure III. 2 : Le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau.....	79
Figure III.3 : Le nombre de régénération par ans en fonction de la teneur en eau.....	79
Figure III.4 : Le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau.....	81
Figure III.5 : Quantité de GN utilisée pendant une régénération en fonction de la teneur en eau pour la deuxième solution.....	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1 : Conditions opératoires de chaque étape du cycle de régénération.....	7
Tableau II. 1 : Compositions chimique du tamis moléculaire UOP UI 94.....	28
Tableau II. 2 : caractéristiques générales des tamis moléculaires.....	28
Tableau II. 3 : Diamètres critique de certaines molécules.....	31
Tableau II. 4 : Vitesse et diamètre du lit.....	34
Tableau III. 1 : La fiche technique du tamis moléculaire.....	40
Tableau III. 2 : La composition de la charge du GPL.....	45
Tableau III. 3 : La composition du gaz de régénération.....	50
Tableau III. 4 : Représentation des données de réchauffage du tamis.....	55
Tableau III. 5 : La composition du gaz de régénération.....	60
Tableau III. 6 : Représentation des valeurs de design et des valeurs calculées.....	62
Tableau III. 7 : La variation du temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau pour un temps de régénération fixe.....	78
Tableau III. 8 : La variation du temps de régénération en fonction de la teneur en eau pour un temps d'adsorption fixe.....	80
Tableau IV. 1 : Durée de vie et changement du tamis.....	83
Tableau IV.2: Le gain annuel en GN et en vie des tamis pour le cycle calculé.....	84

ABREVIATIONS

CH₄ : méthane

C₂H₆ : l'éthane

C₃H₈ : propane

C₄H₁₀ : butane

C₅H₁₂ : pentane

GPL : gaz pétrole liquéfié

GN : gaz naturel

Ppm : partie par million

Ft : Foot l'unité de longueur dans le système d'unités anglais.

Yin : La teneur en eau dans la charge GPL.

PSI : Psia unité de pression.

Nm³ : Normal m³.

Cm³ : Contra m³.

SOMMAIRE

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Listes des figures	
Listes des tableaux	
Listes des abréviations	
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : SECTION DE DESHYDRATATION.

I.1.introduction	4
I.2.Section déshydratation	4
I.2.1 Description Généralité	4
I.2.2 Vannerie de l'unité de déshydratation	5
I.2.2. Description interne du déshydrateur.....	6
I.2.3 Le cycle de régénération.....	7
I.3.Circuit GPL :.....	14

CHAPITRE II : MODE DE DESHYDRSTATION ET TAMIS MOLECULAIRE.

II.1 Introduction	17
II.3 Les Modes de Déshydratation	18
II.3.1 Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates	18
II.3.2 Déshydratation par adsorption dans un liquide	19
II.3.3 Déshydratation par adsorption sur un desséchant solide	19
II.4.1 Généralités	25
II.5 Type et dimension du tamis.....	31
II.6 Adsorption dynamique	33
II.7 Effet des variables de conception du lit	33
II.8 Les Hydrates	35

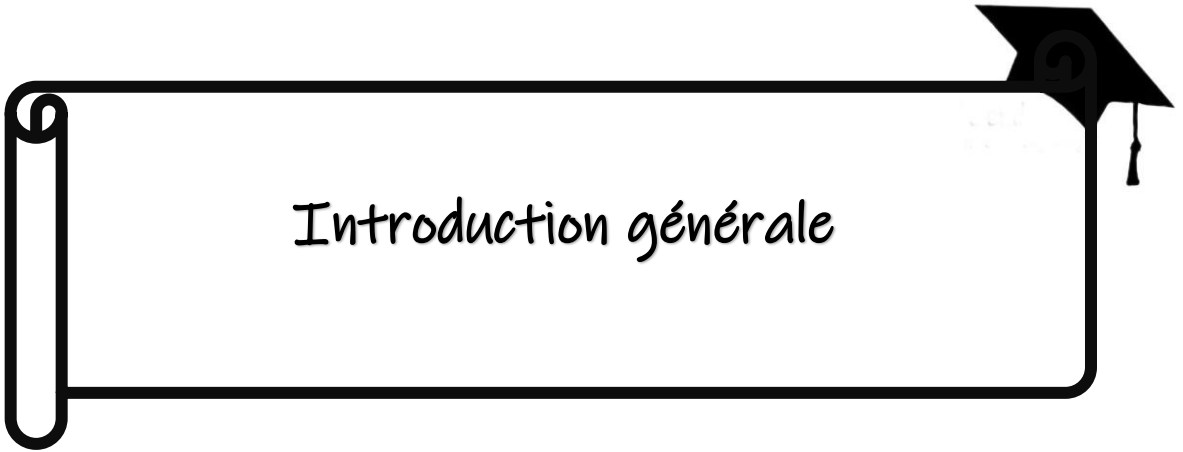
Chapitre III : Optimisation de la section de déshydratation.

Présentation de problème	37
Interprétation de graphe	37
❖ Optimisation de la section de déshydratation de la charge.....	38
III .1 Introduction	38

III.2 Constitution d'un déshydrateur de charge	39
III .3 Les conditions opératoires d'adsorption / désorption	39
III .4Température d'entrée du gaz de régénération :	39
III.5 LA THEORIE DE CALCUL	40
III.5.1 Le Bilan Energétique	40
III.5.2Le bilan de matière de la régénération	42
III.5.3Calcul de la chute de pression.....	43
III.5.4 Calcul du nombre de Reynold.....	43
III.6 Validation de méthode	43
III.7 Etude de la première solution	62
III .7.1Calcul le débit d'eau	62
III .7.2Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse.....	62
III .7.3Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre.....	63
III .7.4Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads}	63
III .7.5 Calcul du temps d'adsorption	63
III .7.7 Détermination de l'efficacité d'adsorption	64
III .8 Calcul du bilan thermique	64
III .9 Etude de la deuxième solution	70
III .9.1 Calcul de débit d'eau	70
III .9.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse.....	71
III .9.3 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre.....	71
III .9.4 Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads}	71
III .9.6 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X) :	72
III .9.7 Détermination de l'efficacité d'adsorption :	72
III .9.8 Calcul du bilan thermique	72
III .9.9 Calcul du bilan de matière de la régénération	74
III .9.10 Interprétation des résultats	75
III .10 Interprétation et choix de la solution optimale.....	75
III .11 Comparaison entre les deux solutions optimales	76

CHAPITRE IV : Etude Technico-Economique.

IV.1 Introduction.....	81
IV.2 Etude économique des résultats de la solution optimale	81
Conclusion Générale.....	86
Références Bibliographique.....	89
Annexes.....	91



Introduction générale

Introduction Générale

L'évolution du marché mondial de l'énergie, et plus particulièrement celle des combustibles tels que le gaz de pétrole liquéfié (GPL), représente aujourd'hui un enjeu stratégique majeur [1]. Si, par le passé, l'énergie était relativement peu coûteuse et suscitait peu d'attention de la part des industriels, l'augmentation progressive des prix a profondément modifié cette perception. Désormais, la consommation énergétique constitue un poste de dépense essentiel, influençant directement les coûts de production et la rentabilité des entreprises industrielles [2].

Dans ce contexte, la gestion de l'énergie s'impose au même titre que la sécurité, le respect de l'environnement ou le contrôle de la qualité [3]. Il devient donc impératif d'optimiser le fonctionnement des équipements pour maximiser les rendements tout en minimisant les pertes énergétiques [4].

Le pétrole et le gaz, ressources naturelles abondantes en Algérie, occupent une place centrale dans l'économie nationale. Le GPL, mélange principalement constitué de propane et de butane, est utilisé à la fois comme source d'énergie et comme matière première dans de nombreuses industries [5]. Afin d'assurer sa qualité et sa stabilité à l'état liquide, le GPL doit subir un processus de déshydratation, généralement réalisé à l'aide de tamis moléculaires. Cette opération repose sur un cycle d'adsorption-régénération impliquant plusieurs sécheurs fonctionnant en alternance [6].

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et à l'**optimisation du fonctionnement énergétique de la section déshydratation du complexe GP1/Z**. L'objectif principal est d'analyser les causes de la consommation énergétique excessive observée au niveau de cette unité, et de proposer des solutions concrètes permettant d'améliorer les performances sans altérer le fonctionnement du complexe ni nécessiter d'investissements lourds [7].

Pour ce faire, notre mémoire est structuré en deux grandes parties :

- Une première partie théorique dans laquelle nous présentons les principes de la déshydratation et les caractéristiques des tamis moléculaires utilisés dans le traitement du GPL.
- Une seconde partie expérimentale portant sur l'analyse énergétique de la section étudiée, basée sur des bilans matière et énergie. Cette analyse a permis de formuler des recommandations visant à prolonger le temps d'adsorption des sécheurs et à optimiser l'utilisation de l'énergie au sein de l'unité.



PARTIE THEORIQUE



CHAPITRE I : SECTION DE
DESHYDRATATION

I.1.introduction :

La déshydratation du gaz de pétrole liquéfié (GPL) brut, en provenance de différents champs de production, constitue une étape indispensable pour éliminer l'eau dissoute dans le flux gazeux. Cette opération permet de prévenir efficacement plusieurs problèmes en aval, notamment le givrage, la formation d'hydrates, ainsi que la corrosion des équipements [8] [9]. Dans chaque train de traitement, la section de déshydratation est composée de trois colonnes d'adsorption remplies de tamis moléculaires, fonctionnant selon un mode cyclique en parallèle : une colonne est dédiée à l'adsorption, une autre à la régénération, tandis que le troisième reste en réserve [6] [3].

Lors de la phase d'adsorption, le gaz s'écoule de bas en haut à travers le lit de tamis moléculaire. Le cycle typique d'adsorption dure environ 36 heures, à l'issue desquelles une permutation des colonnes est effectuée : la colonne en réserve est mise en service, celle en adsorption passe en régénération, et la colonne régénérée devient la nouvelle réserve [10][4]. Ce système offre une grande flexibilité d'exploitation, car il peut fonctionner temporairement avec seulement deux colonnes, facilitant ainsi les opérations de maintenance sans interruption du processus global.

L'ensemble du procédé est entièrement automatisé à l'aide d'un contrôleur matriciel de cycle, permettant un pilotage précis et régulier des séquences d'adsorption et de régénération. L'objectif est de réduire la teneur en eau du GPL de 100 ppm à moins de 5 ppm, seuil conforme aux normes de liquéfaction et de transport [11][5]. Par ailleurs, ce procédé reste adaptable en fonction des caractéristiques spécifiques du gaz traité, ce qui en fait une solution robuste et efficace pour assurer la continuité et la sécurité de l'exploitation [12] [13]

I.2.Section déshydratation :**I.2.1 Description Généralité :****I.2.1 Équipements statiques : (Train-100)**

L'unité de déshydratation de la charge a été conçue pour réduire la teneur en eau du GPL, passant de 100 ppm à 5 ppm. [14]

Elle est composée des équipements suivants :

- ❖ Panneau local : 02-M-1001
- ❖ Sécheurs : 02-V-1001 A/B/C

- ❖ Séparateur démister : 02-V-1002
- ❖ Aérorefroidisseurs : 02-E-1001 A/B
- ❖ Réservoir tampon d'air instrument : 02-V-1020
- ❖ Analyseur : 02-AI-1001
- ❖ Filtres d'entrée de charge : 02-M-1020 A/B
- ❖ Filtres de sortie de charge : 02-M-1021 A/B

I.2.2 Vannerie de l'unité de déshydratation :(Train-100)

a) Vannes individuelles :

- ❖ SWV-1001 (A/B/C) : Entrée GPL, ligne 8"
- ❖ SWV-1002 (A/B/C) : Sortie GPL, ligne 8"
- ❖ SWV-1003 (A/B/C) : Purge GPL, ligne 1,5"
- ❖ SWV-1004 (A/B/C) : Entrée gaz de purge, ligne 1,5"
- ❖ SWV-1007 (A/B/C) : Sortie gaz de réchauffage et entrée gaz de refroidissement, ligne 4"
- ❖ SWV-1010 (A/B/C) : Entrée gaz de réchauffage et sortie gaz de refroidissement, ligne 4"
- ❖ SWV-1012 (A/B/C) : Entrée GPL pour remplissage des sécheurs, ligne 1,5"

b) Vannes communes :

- SWV-1005 : Sortie gaz de refroidissement, ligne 4"
- SWV-1006 : Entrée gaz de réchauffage, ligne 4"
- SWV-1008 : Sortie gaz de réchauffage, ligne 4"
- SWV-1009 : Entrée gaz de refroidissement, ligne 3"
- SWV-1011 : Dépressurisation, ligne 1,5"
- SWV-1013 : Sortie gaz de purge, ligne 1,5"
- PV-1001 : Vanne de régulation de pression du séparateur
- PV-1004 : Vanne de régulation de pression de l'eau de la charge.

I.2.2. Description interne du déshydrateur :

Le déshydrateur est structuré comme suit :

- Une conduite d'entrée située à la base de l'équipement, équipée d'un répartiteur de charge pour le GPL.
- Une grille supportant deux matelas : l'un à maille de 4 mesh et l'autre à maille de 20 mesh, servant de support à deux couches de billes céramiques de diamètres respectifs 1/2" et 1/4".
- Une charge constituée d'alumine active, assurant l'adsorption de l'humidité.
- Un matelas supérieur à maille de 20 mesh, soutenant une troisième couche de billes céramiques de diamètre 1/2".
- Un deuxième matelas à maille de 20 mesh recouvrant cette couche supérieure de billes céramiques.
- Un filtre situé en haut de la colonne, conçu pour empêcher l'entraînement de particules d'alumine.
- Une conduite de sortie permet le transfert du gaz déshydraté vers le fractionnateur. [15]

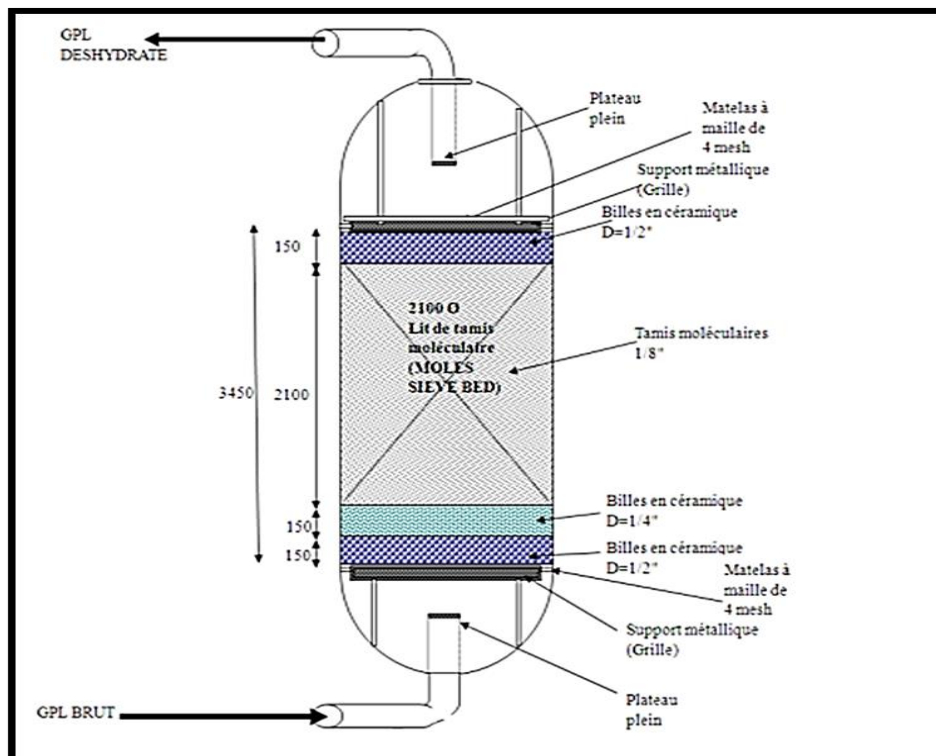


Figure I. 1:Schéma de déshydrateur

I.2.3 Le cycle de régénération :

Le cycle de régénération est composé de plusieurs séquences : drainage, dépressurisation, chauffage, refroidissement, pressurisation et remplissage.

Tableau I. 1 : Conditions opératoires de chaque étape du cycle de régénération.

[14]

Étapes	Temps(H)	P(bar)(Kg/cm²)	T(°C)
Drainage	1	20	30
Dépressurisation	0,5	4,5	30
Chauffage	11	4,5	280
Refroidissent	5	4,5	12,7
Remise de pression	0,5	20	45
Remplissage	1	30	30

A. Drainage :

Dès que le récipient V-1001B est mis en service, la vanne 2A se ferme automatiquement.

Une fois cette vanne fermée, la séquence de régénération démarre par l'opération de drainage du GPL résiduel contenu dans la colonne d'adsorption.

Le GPL brut est évacué vers les réservoirs sphériques d'alimentation, grâce à l'introduction de gaz naturel sous une pression de 20 kg/cm² au sommet de la colonne. Les vannes 3A et 4A s'ouvrent alors pour permettre l'évacuation du GPL, à l'état liquide, vers les réservoirs sphériques.

À ce stade, le contact de niveau LS-1 est activé. Lorsque le niveau du liquide atteint ce point de consigne, la vanne 3A se ferme, suivie de la fermeture de la vanne 4A. L'opération de drainage est ainsi terminée, et le contact LS-1 est désactivé.

La durée estimée pour cette opération est d'environ une heure. [14]

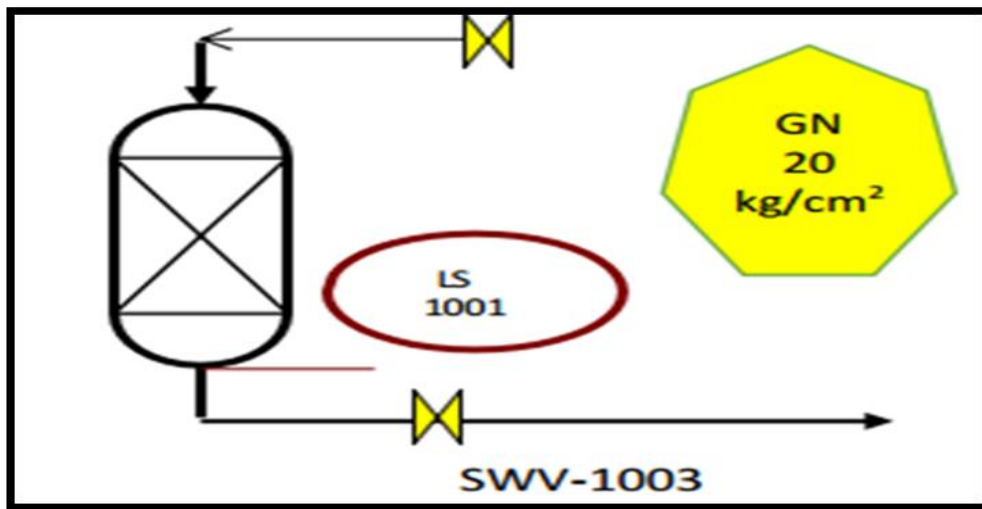


Figure I. 3 : Séquence de drainage

B. Dépressurisation :

Après le drainage complet de la colonne d'adsorption, la pression dans le récipient V-1001A est d'environ 20 kg/cm². Avant d'entamer la phase de chauffage, il est nécessaire de réduire cette pression à 4,5 kg/cm².

Lorsque les vannes 3A et 4A sont fermées, le système de commande automatique enclenche la séquence suivante :

1. Ouverture de la vanne 11,
2. Puis ouverture de la vanne 7A,
3. Mise en service du détecteur de pression différentielle PDS-2.

Cette opération permet une dépressurisation progressive de V-1001A vers le réseau de gaz fuel. Une fois que PDS-2 indique un débit nul, la vanne 11 se referme automatiquement, tandis que la vanne 7A reste ouverte. À la fin de cette étape, la pression dans la colonne atteint 4,5 kg/cm². La durée totale de la dépressurisation est d'environ 30 minutes.

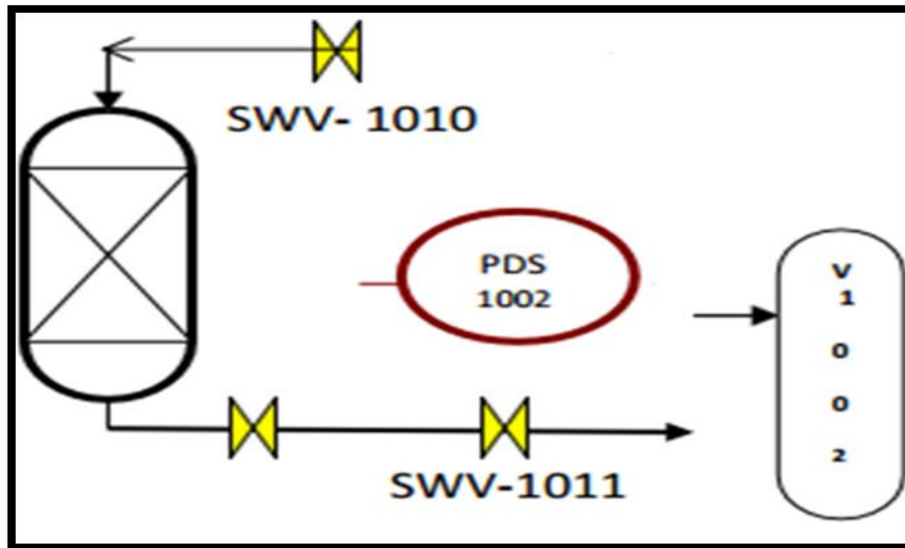


Figure I. 4: Séquence de dépressurisation.

C. Chauffage :

La phase de chauffage constitue l'étape principale de la séquence de régénération, car elle permet l'élimination complète de l'eau adsorbée dans les tamis moléculaires.

❖ Principe de fonctionnement :

Le lit de tamis moléculaire est chauffé de haut en bas à l'aide de gaz naturel porté à 280 °C dans un four à fluide caloporteur.

❖ Démarrage de la séquence :

L'opération commence par l'ouverture des vannes 8, 6 et 10A. Le débit de gaz chaud est régulé de manière constante par un contrôleur, assurant une montée en température progressive du lit pour évacuer l'humidité.

❖ Refroidissement du gaz :

Le gaz en sortie du lit est refroidi à l'aide de l'aéroréfrigérant E-1001, ce qui condense partiellement l'eau qu'il contient.

❖ Séparation de l'eau :

Le gaz refroidi est dirigé vers le séparateur V-1002, où l'eau libre est extraite et envoyée, sous contrôle de niveau, vers les égouts des eaux huileuses.

❖ Gestion du gaz refroidi :

Il est ensuite dirigé vers le réseau de fuel gaz,

Le condensat d'hydrocarbure qui pourrait flotter au-dessus de l'eau est évacué vers le réseau de purge,

Le gaz peut également être envoyé vers la torche, en fonction de la pression mesurée.

❖ Durée et fin de séquence :

Cette phase dure 11 heures. Elle prend fin automatiquement lorsque la température de 250 °C est atteinte au fond du lit, signalée par la sonde TS-1 et le programmeur.

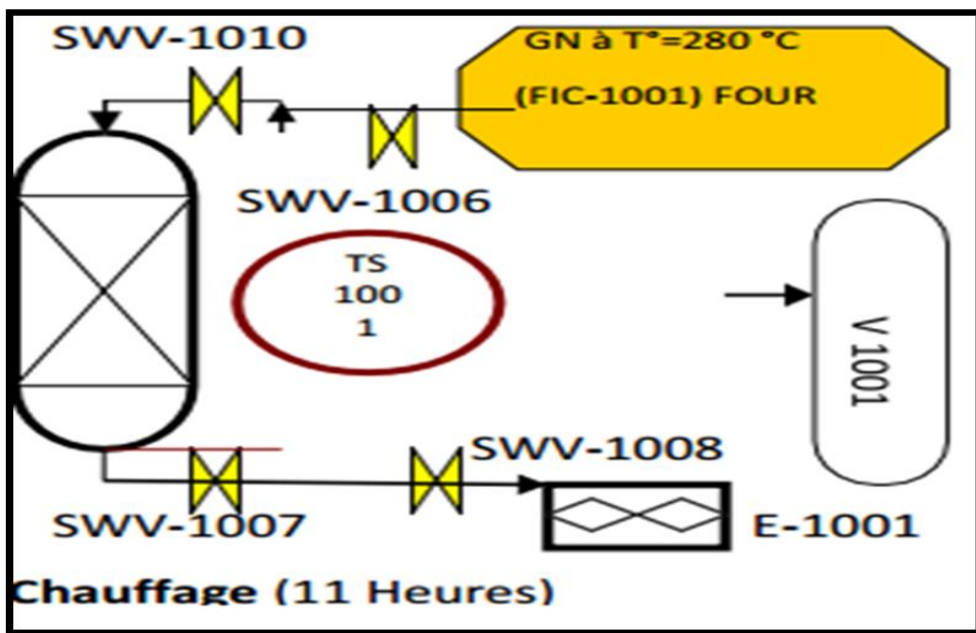


Figure I. 5 : Séquence de chauffage

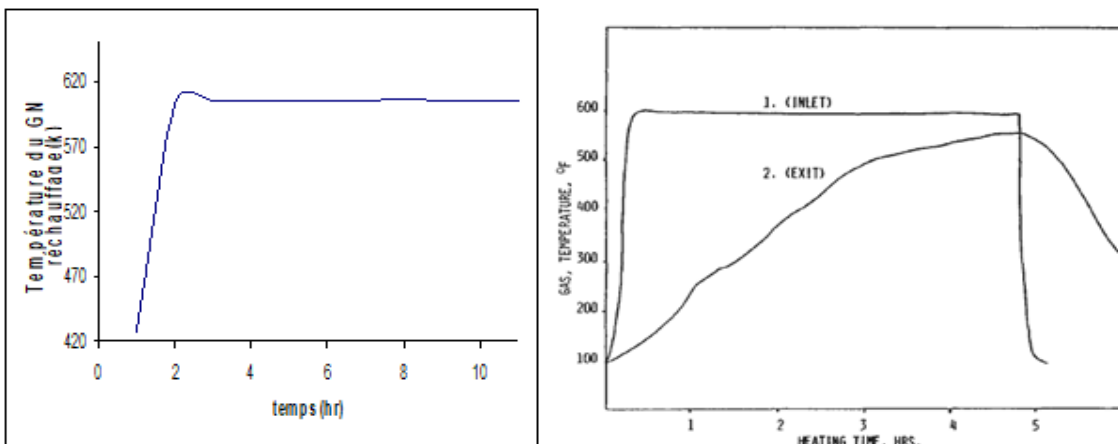


Figure I.6 : Profile de température de régénération. [16]

D. Refroidissement :

Le refroidissement du lit de tamis moléculaire s'effectue en sens inverse du chauffage, c'est-à-dire du bas vers le haut, en utilisant du gaz naturel froid à 12,7 °C.

❖ Démarrage de la séquence :

La phase de refroidissement débute par l'ouverture des vannes 5 et 9, ainsi que la mise en service du capteur TS-2.

Les vannes 7A et 10A, déjà ouvertes lors du chauffage, restent en position ouverte.

L'aéroréfrigérant E-1001 reste également en fonctionnement.

❖ Refroidissement du lit :

Le débit de gaz froid est maintenu constant grâce à un contrôleur de débit. Le gaz circule à travers le lit, abaissant progressivement sa température.

❖ Durée et fin de cycle :

Cette opération dure environ 5 heures. Elle se termine lorsque la température au sommet du lit atteint 45 °C, ce qui est détecté par le capteur TS-2.

❖ Évacuation du gaz :

Pendant cette phase, le gaz utilisé est évacué vers le réseau de fuel gaz.

❖ Clôture de la séquence :

À la fin du refroidissement, les vannes 9, 7A et 5 sont fermées et TS-2 est désactivé, marquant la fin de la régénération thermique.

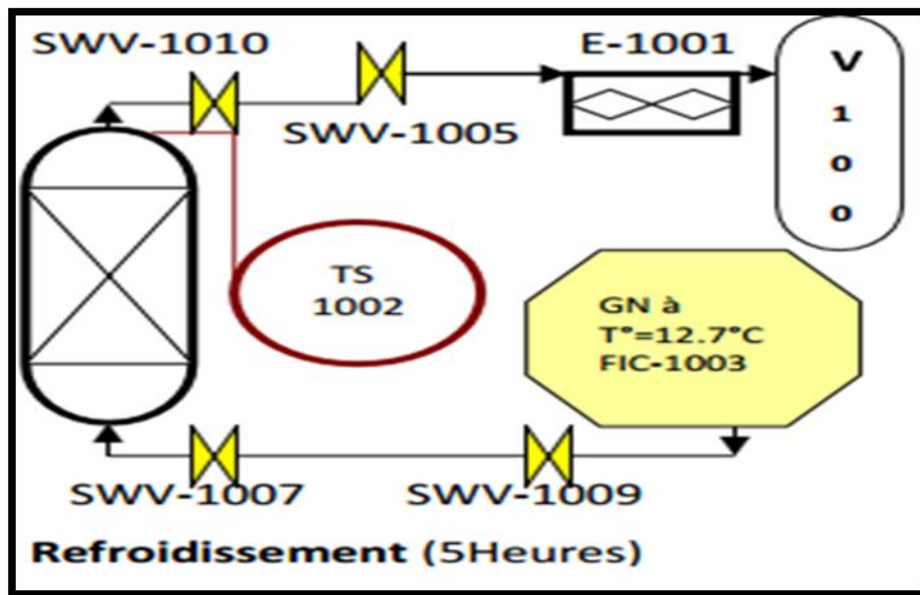


Figure I. 7: Séquence de refroidissement.

E. Remise sous pression :

Avant de réintroduire le GPL liquide dans la colonne V-1001A, celle-ci doit être remise sous pression à l'aide de gaz naturel à 20 kg/cm² eff., afin d'éviter toute détente brutale du GPL, susceptible d'entraîner des pertes de produit.

❖ Déroulement de l'opération :

Un faible débit de gaz naturel sous haute pression est injecté dans la colonne.

Les vannes 13 et 4A s'ouvrent automatiquement et le pressostat PDS-3 est activé.

❖ Montée en pression :

La pression augmente progressivement jusqu'à atteindre le point de consigne de PDS-3.

❖ Une fois cette pression atteinte :

La vanne 4A se referme Le PDS-3 est mis hors service.

❖ Résultat :

À l'issue de cette étape, la colonne V-1001A est stabilisée à une pression de 20 kg/cm² eff.

❖ Durée de l'opération :

La remise sous pression dure environ 30 minutes.

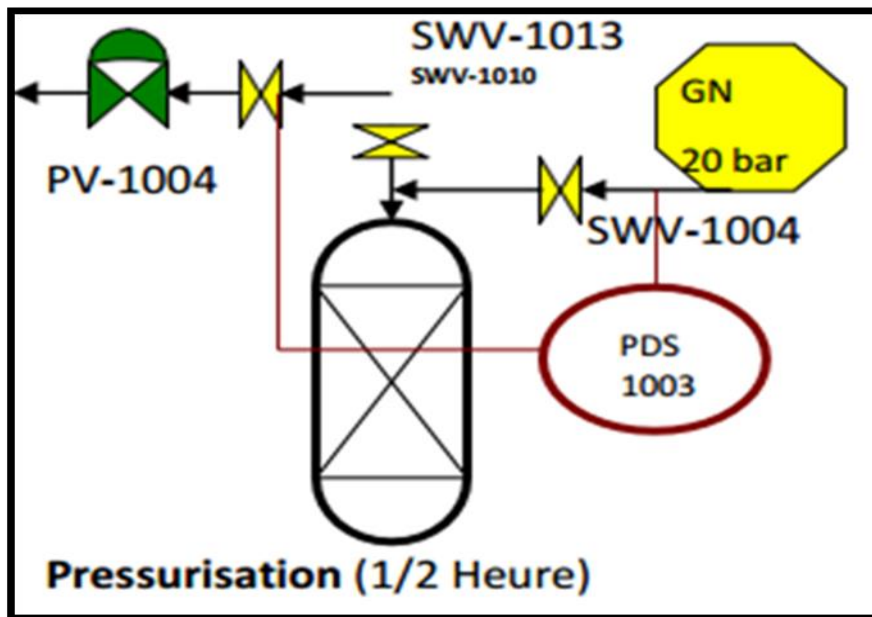


Figure I.8: Séquence de pressurisation.

F. Remplissage en liquide :

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

❖ Progression du liquide :

À mesure que le GPL liquide remplit la colonne de bas en haut, le gaz résiduel est évacué par le haut, sous contrôle de pression.

❖ Arrêt automatique :

Lorsque le niveau du liquide atteint le capteur LS-2, la vanne 12A se ferme automatiquement, marquant la fin du remplissage.

❖ Durée de l'opération :

Cette étape prend environ 1 heure.

❖ Mise en réserve de la colonne :

À ce stade, V-1001A a terminé son cycle de régénération et est désormais placée en réserve.

La durée de disponibilité en réserve est généralement de 53 heures.

❖ Enchaînement des cycles :

Après 17 heures, le cycle d'adsorption de V-1001B se termine, déclenchant à son tour son cycle de régénération.

Pendant ce temps, V-1001C est mise en ligne pour commencer l'adsorption, tandis que V-1001A reste en attente en réserve.

Le figure ci-dessous représente la section déshydratation de charge (train 100).

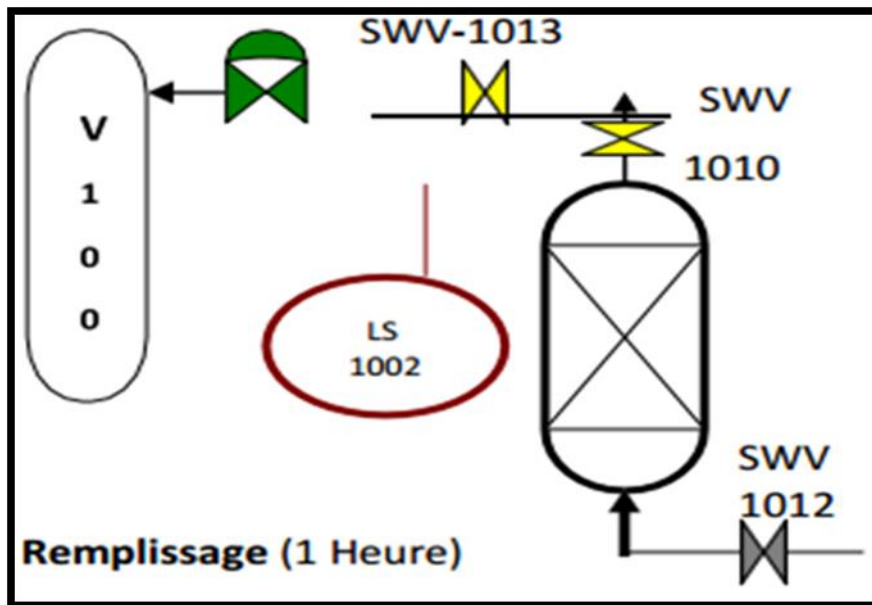


Figure I. 9: Séquence de remplissage.

I.3.Circuit GPL :

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) brut, stocké dans les sphères de stockage, est transféré vers les trains de traitement (100, 500 et 700) au moyen des pompes de charge P-0011. À l'entrée de chaque train, le flux traverse successivement un densimètre permettant la mesure en continu de la densité, une vanne de sécurité (XV-N001), un clapet anti-retour, ainsi qu'un transmetteur de débit (FT) couplé à un transmetteur de pression (DT). Ces équipements sont asservis à un régulateur de débit (FIC-N002) chargé de maintenir un débit constant à l'entrée de la colonne de fractionnement, garantissant ainsi un fonctionnement stable du procédé [9], [10]

Avant d'accéder à la section de déshydratation, le GPL passe par un analyseur d'humidité en ligne, qui permet de surveiller la teneur en eau en temps réel. Il traverse ensuite des filtres d'entrée (M-N020A/B) équipés de détecteurs de colmatage (PDG-N006). Ces derniers déclenchent une alarme lorsque la perte de charge atteint $\Delta P = 0,4 \text{ kg/cm}^2$, signalant un encrassement nécessitant une intervention [17].

Le GPL est ensuite dirigé vers le sécheur actif via la vanne SWV-N001. Le sécheur contient un lit fixe de tamis moléculaire assurant l'adsorption de l'humidité. À la sortie, le produit est de nouveau filtré à travers les filtres de sortie (M-N021A/B), également munis de détecteurs de colmatage (PDG-N004) calibrés sur le même seuil de perte de charge ($\Delta P = 0,4 \text{ kg/cm}^2$).

Enfin, un détecteur de pression différentielle (PDSH-N007), installé entre l'entrée et la sortie du circuit de déshydratation, assure une surveillance continue de l'état hydraulique. Une alarme commune est générée lorsque la pression différentielle atteint $1,5 \text{ kg/cm}^2$, signalant un possible colmatage du lit ou une perte de performance du système [18].

Après un certain temps défini par une minuterie (TIMER), le tamis moléculaire saturé est automatiquement régénéré, tandis que le sécheur en veille prend automatiquement le relais pour assurer la continuité du processus de déshydratation. [15]



CHAPITRE II : MODE DE DESHYDRSTATION ET
TAMIS MOLECULAIRE.

II.1 Introduction :

La section de déshydratation de la charge liquide est constituée de trois colonnes d'adsorption fonctionnant en parallèle, remplies de tamis moléculaires. À tout instant, une colonne est en service pour l'adsorption, une seconde est en phase de régénération, tandis que le troisième reste en réserve. Cette configuration permet une opération continue du procédé, tout en assurant l'alternance cyclique des rôles entre les colonnes [9].

La durée typique d'un cycle d'adsorption est de 36 heures. Une fois ce délai écoulé, la colonne en réserve est automatiquement mise en service pour l'adsorption. La colonne précédemment en service entre alors en régénération, tandis que celle ayant achevé son cycle de régénération retourne en mode réserve. Ce cycle rotatif garantit la disponibilité constante d'une colonne opérationnelle sans interruption du processus [6].

Durant la phase d'adsorption, l'écoulement du GPL à travers le lit fixe se fait du bas vers le haut, favorisant une distribution homogène du fluide dans le lit de tamis moléculaire. La conception de l'unité permet également un fonctionnement en mode dégradé avec seulement deux colonnes, ce qui autorise la maintenance préventive ou corrective de la troisième sans compromettre la continuité du traitement [10].

Le fonctionnement de cette section est entièrement automatisé, piloté en continu par un contrôleur matriciel de cycle. Ce programmeur gère avec précision les séquences d'ouverture et de fermeture des vannes, les basculements entre colonnes et les étapes du cycle de régénération, assurant une fiabilité et une sécurité optimales du système [19].

II.2 But de section déshydratation :

Ce procédé très important utilise en générale dans le traitement des gaz en amont de la partie séparation et réfrigération est considéré comme un prétraitement pour :

- ✓ Empêcher la corrosion des équipements en éliminant la vapeur d'eau du gaz surtout si le gaz de séparation contient du CO₂ car $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Acide carbonique}$ (qui n'existe qu'en solution sous forme ionique).
- ✓ Supprimer le risque d'arrivées de gouttelettes dans les rotors des compresseurs centrifuges.
- ✓ Réduire les pertes de charges dans les pipelines et amoindrir l'accumulation d'eau libre dans les points bas.

- ✓ Permettre les traitements en aval tel que dégazolinage et récupération des GPL.
- ✓ Diminuer la charge de travail des sécheurs à tamis moléculaires en amont Des turbo-détendeurs.
- ✓ Pour éviter les problèmes de corrosion des réseaux de gaz lift ou gaz injection.
- ✓ Diminution de pouvoir calorifique de gaz.
- ✓ Eviter de solidification dans les procédés cryogéniques [20].

II.3 Les Modes de Déshydratation :

Plusieurs techniques ont été appliqué pour empêcher l'obstruction des canalisations de transport ou des unités de traitement du GPL par les hydrates.

La plus courante est : la réduction de la teneur en eau par la déshydratation.

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

- Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates.
- Déshydratation par adsorption dans le liquide.
- Adsorption sur un agent desséchant solide. [6] [3]

II.3.1 Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates :

II.3.1.1 Injection de glycol :

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

- Injection glycol liquide.
- L'éthylène glycol (E.G).
- Le tri-éthylène -glycol (T.E.G).
- Le di-éthylène glycol (D.E.G).

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.

Le glycol agit en absorbent l'eau, empêchant ainsi la création des conditions propices à la formation d'hydrates d'hydrocarbures solides.

II.3.1.2 Injection de méthanol :

L'injection de méthanol dans un courant gazeux est une méthode courante pour prévenir la formation d'hydrates.

Cependant, lorsque la formation d'hydrates est minimale, des injections intermittentes de méthanol sont souvent privilégiées.

II.3.2 Déshydratation par adsorption dans un liquide :

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

- Affinité élevée pour l'eau.
- Non corrosif et non coûteux.
- Stabilité de sa régénération.
- Faible pression de vapeur à la température de contact.
- Déshydratation faible tendance à former une mousse et faible viscosité.

En effet deux composés organiques répondent d'une manière satisfaisante à toutes ces exigences : le diéthylène glycol (DEG) et le triéthylène glycol (TEG).

II.3.3 Déshydratation par adsorption sur un desséchant solide : [15]**A. Généralité :**

L'adsorption est une opération physique utilisée pour séparer physiquement les mélanges, où un fluide est mis en contact avec un solide, créant une variation de composition entre la phase adsorbée proche du solide et la phase fluide.

L'étude d'analyse des équilibres d'adsorption permet de révéler le niveau maximum de séparation possible dans des conditions thermodynamiques spécifiques.

L'étude de la cinétique de l'adsorption permet de comprendre la vitesse à laquelle on s'approche des composants du mélange séparés dans un système qui atteint son état d'équilibre.

Ce processus est influencé par la diffusion des composants à séparer à travers l'adsorbant et le fluide, outre, les conditions hydrodynamiques du contact. Elle permet d'évaluer l'efficacité d'un équipement et d'un appareillage. [15]

B. Description phénomène du procédé d'adsorption :

Quelques soit la nature type des forces auxquels il est soumis, un atome en périphérie d'un solide se différencie d'un atome situé en profondeur du fait la somme des forces qui lui sont appliquées n'est pas égale à zéro.

Les éléments constituant la surface d'un solide, tels que les molécules, ions ou atomes formant d'un solide sont soumis à des forces dissymétriques qui se manifestent par un champ des forces attractif, il portée limité à des distances de l'ordre de grandeur des dimensions des atomes.

Cependant, il est suffisant pour attirer les molécules de gaz ou de liquide situé ou voisinage immédiate de l'interface, entraînant ainsi la fixation des molécules à la surface.

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

Lorsqu'un adsorbant est plongé dans un fluide, la composition de ce dernier varie plus ou 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 classer soit dans catégorie d'adsorption physique soit dans adsorption chimique. [21].

C. La zone de transfert de masse (ZMT) :

L'adsorption est phénomène de transfert de masse et le transfert des molécules du fluide vecteur aux ports de l'adsorption demande un temps fini.

Ce temps est influencé par :

- La concentration (la quantité d'adsorbat devant être transférée).
- La présence de la molécules concurrentes ou interférent.
- L'ouverture des passages de diffusion (micropores) à l'intérieur des particules d'adsorbant, et la taille des pores actuels adsorbant. [13]

La longueur du lit à travers laquelle un incrément de gaz passe pendant dans le processus de transfert de gaz n'importe quel composant de la phase gazeuse à la phase solide, est appelée la zone de transfert de masse (ZMT). (Voir la figureII.1).

En réalité, la ZMT est précédé d'une zone d'équilibre, et sa longueur correspond environ à un tiers de la zone de saturation.

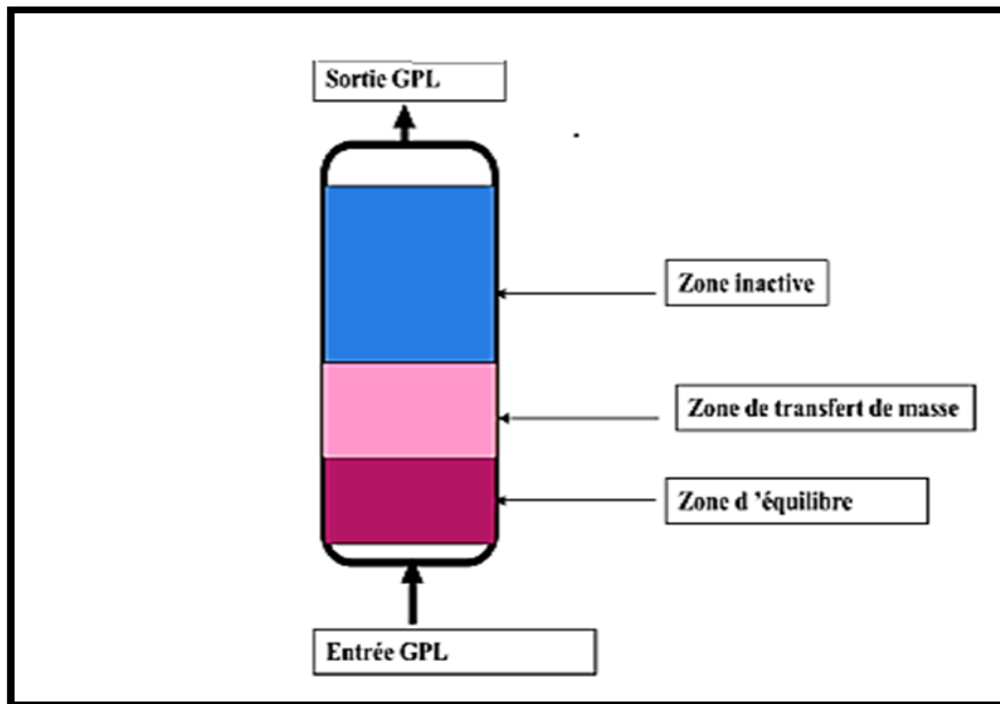


Figure II.1: La zone ZMT se déplace lors de l'adsorption.

A l'instant où l'eau apparaît dans la charge à la sortie de la section de déshydratation s'appelle temps de rupture et il s'obtient quand le rapport

$$C1/C0 = 5\%.$$

Si la charge continue son passage à travers le lit, on arrive à un instant où la concentration de l'eau dans l'effluent est presque égale à celle contenue dans la charge ($C1/C0 = 95\%$), c'est temps de saturation.

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

- De la cinétique de l'adsorption, de l'adsorbat.
- Des caractéristiques thermodynamiques du fluide vecteur.
- De la vitesse linéaire superficielle.
- Des types, de la forme et de granulométrie du tamis moléculaires.
- Des concentrations $C0$ et Cs [22].

La zone de transfert de masse est égale $1/3$ de la zone de saturation, par mesure de sécurité, il est courant d'ajouter 0,3 à 0,6m de desséchant au fond du lit, ce qui permet d'éviter que le point de

percée ne se situe dans la zone active. (Voir la figureII.2).

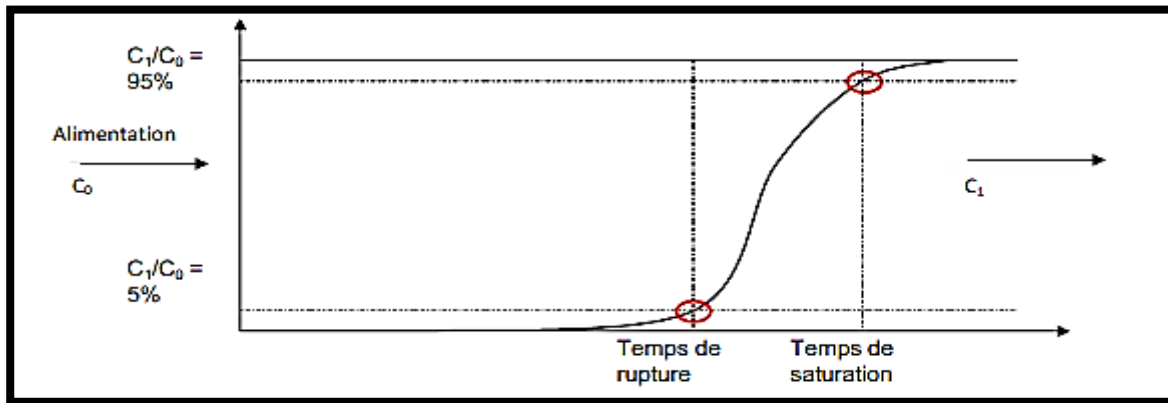


Figure II.2: La courbe de percée.

Dans la pratique on limite le temps du cycle d'adsorption quand $t_{\text{cycle}} = t_{\text{rupture}}$ la Z.M.T, est une fonction de :

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

C. Concept de la zone de transfert de masse :

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'adsorbant à la sortie varie en fonction de la concentration initiale.

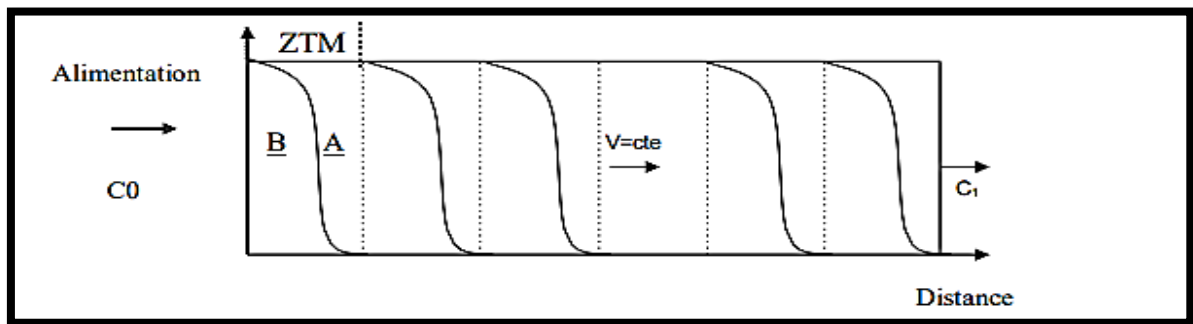
En amont de la zone de transfert, l'adsorbant est saturé.

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'adsorbant.
- Des caractéristiques thermodynamiques du fluide.
- De la vitesse linéaire superficielle.

- Du type, de la forme et de la granulométrie du tamis moléculaire. [21]



E.

Figure II.3: Evolution de la concentration de l'adsorbant(fluide)au cours au l'adsorption.

Principaux adsorbants : [13] [15]

Cinq types d'agents desséchants sont couramment utilisés :

- Le gel de silice. (Silicagel)
- L'alumine activée.
- L'alumingel.
- Le charbon actif.
- Le tamis moléculaire

Leur fonctionnement exact n'est pas entièrement compris, mais il repose sur l'adsorption.

Tous ces agents desséchants fonctionnent par un phénomène qui n'est pas bien compris.

Dans les solides, les forces de cohésion maintiennent les atomes ensemble, ces forces d'équilibrées sont créant une faible attraction pour les molécules du fluide environnant semblable à une attraction magnétique.

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

- ✓ **Concentration des forces d'adsorption** : les force d'adsorption sont plus fortes lorsque courbures de surfaces, comme celles des cylindres ou des pores.
- ✓ **Forces de condensation** : lorsque le diamètre d'un pore s'approche du diamètre de la molécule à adsorber les forces est commencent à se concentrer plus intenses entrent en jeu.

1. Silicagel :

Le Silicagel est un matériau poreux utilisé comme agent desséchant. Il se présente sous forme de poudre ou de granulés de différentes tailles et sa formule chimique est $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Le Silicagel est amorphe, c'est-à-dire qu'il n'a pas de structure cristalline définie. Il possède également une grande porosité, avec des pores d'un diamètre moyen d'environ 40 Å.

Sa capacité d'adsorption d'eau est la plus élevée de tous les agents desséchants courants, atteignant 40 kg d'eau pour 100 kg de Silicagel.

Cela permet d'abaisser le point de rosée jusqu'à -60°C (environ 10 ppm d'humidité).

2. L'alumine activée :

L'alumine activée est une forme poreuse et amorphe de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), ce qui signifie qu'elle n'a pas de structure cristalline définie.

Sa capacité d'adsorption d'eau, l'alumine active peut adsorber jusqu'à 17-19% de son poids en eau, ce qui en fait un excellent déshydratant pour les applications industrielles, elle est inférieure à celle du Silicagel, mais elle permet d'atteindre des points de rosée très bas, jusqu'à -70°C , voir 75°C (environ 1 ppm d'humidité).

3. L'aluminagel :

L'aluminagel, également connu sous le nom de gel de silice alumine, est un agent desséchant efficace capable de réduire la teneur en eau d'un fluide jusqu'à un point de rosée de -60°C (environ 10 ppm d'humidité).

Ses capacités de séchage sont comparables à celles du Silicagel et inférieures à celles de l'alumine activée.

4. Charbon actif

Le charbon actif est un agent desséchant très efficace, particulièrement pour absorber les hydrocarbures et les matières organiques général.

Ils sont couramment utilisés pour la récupération des solvants.

Il est fabriqué par traitement thermique de matières premières comme les coquilles de noix ou le charbon, en absence d'air.

Le produit final se présente sous forme granulé.

La régénération de charbon actifs s'effectue à des températures inférieures à 150 °C.

5. Tamis moléculaire

Les tamis moléculaires sont des matériaux cristallins composés d'aluminosilicates, présentant une structure poreuse aux dimensions moléculaires précises.

Ils peuvent une capacité d'adsorption d'eau environ 10 % de leur poids.

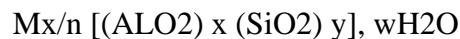
La régénération des tamis moléculaires s'effectue en faisant passer un gaz sec à environ 280 °C.

Ils utilisent largement dans le domaine de déshydratation du gaz naturel. [23]

II.4 Tamis moléculaires :

II.4.1 Généralités :

Les tamis moléculaires sont des adsorbants uniques et intéressants qui sont disponibles. Les tamis moléculaires sont des aluminosilicates de métaux hydratés cristallins offrant un certain nombre de propriétés inhabituelles. Leur formule chimique générale est :



N étant la valence du cation M, x et y des nombres entiers avec y/x égal ou supérieur à 1 et w le nombre de molécules d'eau par maille.

Les tamis moléculaires des miracles de la science pour des séparations ultra-précises. [22]

Dans le domaine de l'adsorption, Les tamis moléculaires diffèrent des agents adsorbants traditionnels principalement par leur aptitude à adsorber des petites molécules tout en excluant de grandes molécules, si bien que des séparations peuvent être effectuées sur les différences de taille des molécules (voir l'annexe A et B). [24]

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

Des merveilles de la nature au service de l'industrie Les tamis moléculaires, également connus sous le nom de zéolithes, sont des composés à base d'aluminosilicates de métaux hydratés cristallins. Ils représentent une classe d'adsorbants fascinants et uniques disponibles sur le marché. Leurs propriétés hors du commun les rendent particulièrement précieux dans une multitude de domaines d'application. Inspiration naturelle pour des performances exceptionnelles Bien que

synthétiques, les tamis moléculaires s'inspirent fortement de certains minéraux naturels. Leur structure cristalline unique se caractérise par un réseau microporeux à l'échelle moléculaire, composé de cavités poreuses de tailles variables définies par les cations présents. Ce réseau de canaux agit comme un filtre sélectif, permettant l'adsorption de molécules spécifiques en fonction de leur taille.

L'eau occupant le réseau poreux peut être désorbée par chauffage ou balayage de gaz sec, libérant ainsi un volume microporeux qui représente 20 à 50 % du volume du cristal.

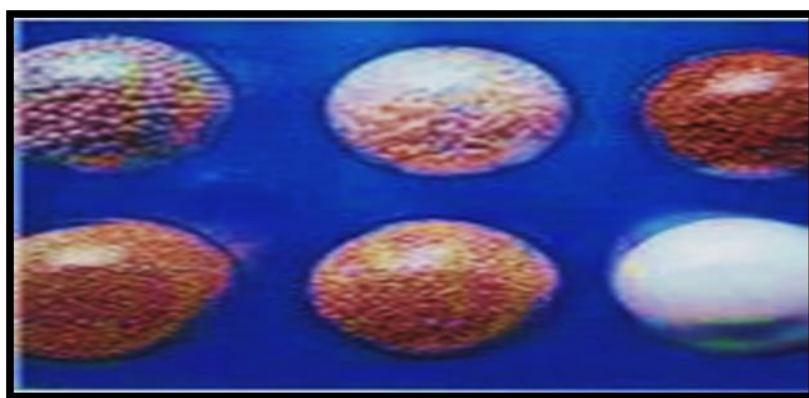
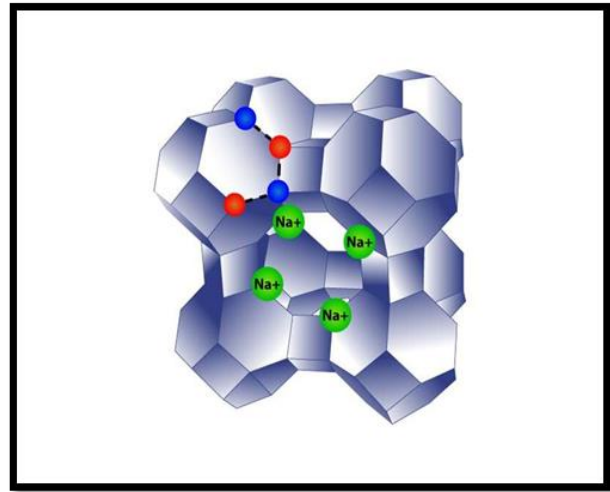
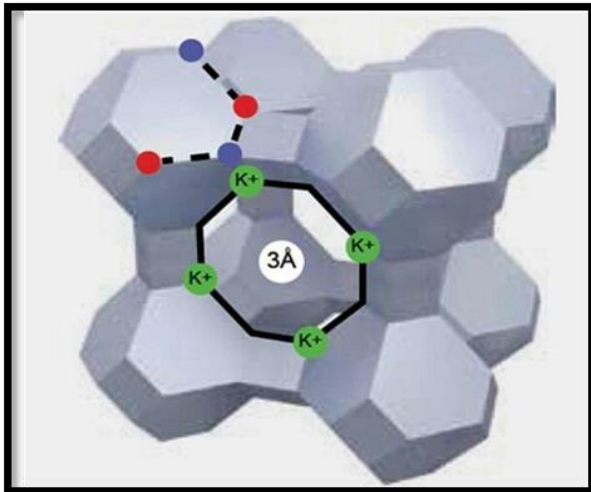


Figure II.4: Tamis moléculaire sous ses différentes formes.

Rôle des cations et diversité des tamis moléculaires La présence de cations dans la structure des tamis moléculaires joue un rôle crucial dans la compensation des charges électriques. Bien que leurs structures cristallines puissent présenter de légères variations, les types les plus courants et les plus importants sont les types A et X (voir l'annexe 1). Ces tamis trouvent de nombreuses applications en tant qu'agents adsorbants commerciaux. Tamis de type A : des cavités sélectives pour des séparations précises Les tamis de type A se distinguent par des cavités d'accès de tailles différentes, déterminées par le cation de compensation présent. On trouve ainsi des tamis 3Å (tamis 3A), 4Å (tamis 4A) et 5Å (tamis 5A). Cette diversité de tailles permet une adsorption sélective : les tamis 3A et 4A, par exemple, peuvent capturer l'eau à l'intérieur de leur structure microporeuse tout en excluant les hydrocarbures [21].



Tamis moléculaire 3A.

Tamis moléculaire 4A.

Figure II.5: Tamis moléculaire 3A et 4A.

La nature des cations de compensation est un paramètre d'optimisation de la sélectivité de l'adsorbant. Ainsi la zéolithe A est synthétisée sous la forme Na, qui présente un diamètre de pores effectif de $3,8 \text{ \AA}$ (type 4A). Par échange du Na par K on prépare le type 3A qui présente une ouverture de pore plus petite à cause de la plus grande taille de l'ion K^+ . Ceci permet d'obtenir une zéolithe laissant entrer les molécules d'eau mais excluant les oléfines, utilisé pour le séchage des coupes oléfiniques.

Au contraire, par échange partiel du Na par du Ca on prépare le type 5A présentant une plus grande ouverture des pores et capable d'adsorber les paraffines linéaires en excluant les paraffines ramifiées.

Composition chimique des tamis moléculaires : [25]

3A: $0.6 \text{ K}_2\text{O} : 0.40 \text{ Na}_2\text{O} : 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 : 2.0 \pm 0.1 \text{ SiO}_2 : x \text{ H}_2\text{O}$

4A: $1 \text{ Na}_2\text{O} : 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 : 2.0 \pm 0.1 \text{ SiO}_2 : x \text{ H}_2\text{O}$

5A: $0.80 \text{ CaO} : 0.20 \text{ Na}_2\text{O} : 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 : 2.0 \pm 0.1 \text{ SiO}_2 : x \text{ H}_2\text{O}$

13X : $1 \text{ Na}_2\text{O} : 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 : 2.8 \pm 0.2 \text{ SiO}_2 : x \text{ H}_2\text{O}$

La composition typique du tamis moléculaire UOP UI 94 est donnée dans le tableau suivant :

Tableau II. 1: Compositions chimique du tamis moléculaire UOP UI 94 [25]

Composition (% mass)	UOP UI94 1/8"
Al ₂ O ₃	35-36
SiO ₂	46-47
Na ₂ O	15-16
K ₂ O	<1
CaO	<1
MgO	<0,5
Fe ₂ O	<1
TiO ₂	<0,5
P ₂ O ₅	<0,5

Les caractéristiques de base des tamis moléculaires sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II. 2:caractéristiques générales des tamis moléculaires.

Type de Base	Diamètre minimal des pores (A°)	Forme Commune	Capacite d'adsorption H ₂ O, % masse	Molécules adsorbées	Applications
3A	3	Poudre	23	Molécules avec un diamètre effectif <3 angströms, Y compris H ₂ O et NH ₃	Séchage des gaz craqués (séchage d'oléfines) séchage des liquides organiques
		1/16in bâtonné	20		
		1/8in bâtonné	20		

		8 x 12 granulé	20		
		4 x 8 granulé	20		
4A	4	Poudre	28,5	Molécules avec un diamètre effectif <4 angströms, Y compris éthanol, H ₂ S, C ₂ H ₄ et C ₃ H ₆	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Séchage de l'hydrogène ▪ Séchage de gaz d'hydrocraquage ▪ Séchage d'air à basse pression ▪ Séchage de gaz naturel ▪ Elimination de H₂S, CO₂ du gaz naturel ▪ Séchage des liquide organiques.
		1/16in bâtonné	22		
		1/8in bâtonné	22		
		8 x 12 granulé	22		
		4 x 8 granulé	22		
		14 x 30 Mesh	22		
5A	5	Poudre	28	Molécules avec un diamètre effectif <5 angströms, Y compris n-C ₄ H ₉ OH de C ₃ H ₈ à C ₂₂ H ₄₆	Séparation des n-paraffines des iso-paraffines et les hydrocarbures cycliques
		1/16in bâtonné	21,5		
		1/8in bâtonné	21,5		
10x	8	Poudre	36	Molécules avec un diamètre effectif <8 angströms, Y compris les iso-paraffines et les oléfines	Séparation des hydrocarbures aromatiques
		1/16in bâtonné	28		
		1/8in bâtonné	28		
		Poudre	36		

13x	10	1/16in bâtonné	28,5	Molécules avec un diamètre effectif <8 angströms	Séchage et purification de l'air (élimination simultanément de H ₂ O et CO ₂)
		1/8in bâtonné	28,5		
		8 x 12 granulé	28,5		
		4 x 8 granulé	28,5		

L'adsorption sur les tamis moléculaires implique deux mécanismes Principaux :

1. Condensation capillaire : Les molécules sont attirées par les forces intermoléculaires à l'intérieur des pores, similaires à la condensation de l'eau sur les parois d'un verre.
2. Adsorption par interaction électrostatique : La distribution inégale des charges dans la structure du tamis moléculaire crée une surface polaire qui attire les molécules polaires, comme l'eau, par des forces électrostatiques.

Par rapport à d'autres déshydratants tels que le gel de silice ou l'alumine, les tamis moléculaires offrent plusieurs avantages :

- Déshydratation plus efficace : Ils permettent d'atteindre des teneurs en eau très faibles, de l'ordre de 1 ppm.
- Sélectivité : Ils peuvent adsorber sélectivement certaines molécules, comme l'eau, tout en laissant passer d'autres gaz.
- Capacité d'adsorption élevée : Ils possèdent une grande surface interne, permettant d'adsorber une grande quantité de molécules.
- Résistance à la régénération : Ils peuvent être régénérés et réutilisés à maintes reprises sans perte de performance.

Les tamis moléculaires sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment :

- Déshumidification de l'air : Ils sont utilisés pour sécher l'air dans les industries pharmaceutiques, chimiques et alimentaires.
- Purification des gaz : Ils sont utilisés pour éliminer l'eau, le CO₂ et d'autres contaminants des gaz industriels.

- Séchage des solvants : Ils sont utilisés pour déshydrater les solvants dans les industries pharmaceutiques et chimiques.
- Catalyse : Ils sont utilisés comme catalyseurs dans certaines réactions chimiques.

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

- La concentration en H₂O doit être faible.
- Il est peu recommandé pour les grands débits de charge.
- Le pourcentage résiduel d'eau est très faible.
- Il nécessite un fonctionnement discontinu.
- La présence de COS et CS₂ est nuisible.

L'adsorbant est un produit cher et doit être remplacé tous les 3 ans.

II.5 Type et dimension du tamis

Le tamis moléculaire utilisé pour la déshydratation du GPL est de type 4°A. Ce dessicant adsorbe les molécules ayant un diamètre effectif inférieur à 4°A y compris H₂S, CO₂, l'éthane et les hydrocarbures les plus légères, en excluant toutes les molécules ayant un diamètre effectif supérieur à 4°A.

Les usines de GPL préfèrent utiliser des granulés, car les granulés de petits diamètres offrent une surface plus importante par unité de volume pour le transfert de masse. [21]

Tableau II. 3: Diamètres critique de certaines molécules.

Molécule	Molécule Diamètre critique (A)
Hydrogène	2,4
Acétylène	2,4
Oxygène	2,8
Monoxyde de carbone	2,8
Dioxyde de carbone	2,8
Azote	3,0
Eau	2,8

Ammoniac	3,6
Sulfure d'hydrogène	3,6
Méthane	4,0
Ethylène	4,2
Ethane	4,4
Méthanol	4,4
Ethanol	4,4
Mercaptan méthylique	4,5
Propane	4,9
Propylène	5,0
Mercaptan éthylique	5,1
Butène	5,1
1,3-Butadiène	5,2
Chlorodifluorométhane (R-22)	5,3
Thiophène	5,3
i-Butane à 1-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
Triméthylamine lamine	8,4

La structure finale des tamis moléculaires zéolitiques intègre des cations sodium, potassium ou calcium au sein de leur réseau cristallin.

Ces cations, appelés "cations équilibrants", assurent la neutralité électrique de la structure et constituent les sites d'échange ionique caractéristiques des zéolites.

Les propriétés des tamis moléculaires, telles que les données d'équilibre, peuvent être représentées sous forme d'isothermes (voir Annexe 1).

Ces isothermes illustrent la relation d'équilibre entre le fluide et le solide, où la concentration de l'adsorbat (l'eau dans notre cas) dépend à la fois de la concentration de l'eau dans la phase fluide (pression partielle) et de la température d'adsorption.

Une caractéristique notable des tamis moléculaires est leur capacité d'adsorption élevée même à faibles concentrations de l'adsorbat.

De plus, ils présentent une affinité particulière pour les composés polaires et non saturés.

II.6 Adsorption dynamique :

L'adsorption est un phénomène de surface qui correspond à la fixation des molécules d'un fluide à la surface d'un solide.

Les solides poreux, qui présentent une grande porosité interne et dont la surface développée de support est de l'ordre de plusieurs centaines de m^2/gr de par leur structure cristalline à pores de dimensions bien déterminées, ont une sélectivité d'adsorption maximale.

Dans le cas de l'adsorption 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 [26].

II.7 Effet des variables de conception du lit :

L'adsorption est un processus qui s'effectue au fil du temps, c'est-à-dire qu'elle dépend de la vitesse à laquelle les molécules du fluide se fixent sur la surface du solide.

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 atteigne pratiquement zéro.

La longueur de cette zone dépend de plusieurs facteurs, tels que :

- Les propriétés de l'adsorbat et de l'adsorbant (nature des molécules, surface spécifique du matériau, etc.).
- Les conditions d'opération (débit, température, pression).
- La géométrie du lit adsorbant (longueur, diamètre, arrangement des particules).

II.7.1 Vitesse et diamètre du lit :

En général, les lits adsorbants longs et de faible diamètre s'avèrent plus efficaces que les lits courts et de grand diamètre.

Le tableau ci-dessous présente trois configurations de lit pour le séchage de l'air sur tamis moléculaire. Bien que toutes fonctionnelles correctement, il est important de noter que les lits de petit diamètre offrent une meilleure efficacité. [26]

Tableau II. 4 : Vitesse et diamètre du lit.

Tamis Moléculaire	Capacité Utile Adsop d'eau (ft)	Diamètre du lit (ft)	Haut du lit (ft)	Chaut 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

II.7.2 Teneur en adsorbat de l'effluent :

La capacité utile du lit adsorbant dépend en outre également de la concentration 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. [26]

II.8 Les Hydrates : [15]

8.1 Définition :

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

8.2 Les formules chimiques des hydrates :

Il y 'a deux structures pour les hydrates des GPL.

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

8.3 Les conditions de formations d'hydrates : [15] [27]

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

a. Les conditions primaires :

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

b. Les conditions secondaires :

- ❖ Vitesses élevées.
- ❖ L'introduction d'un petit cristal d'hydrate.
- ❖ Un site physique pour la formation d'hydrates tels que : pipes, orifice.

Chapitre III : Optimisation de la
section de déshydratation



Présentation de problème

Le problème étudié dans ce travail concerne l'impact de la diminution de la teneur en eau du GPL sur les paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation du complexe GP1/Z. Conçue pour traiter une charge présentant une concentration en eau dissoute de 100 ppm, cette section ne fonctionne aujourd'hui plus dans ses conditions nominales, en raison du prétraitement effectué sur la charge en provenance des champs du sud, qui réduit significativement la teneur en eau en amont du processus [10].

Selon le design initial, la durée du cycle d'adsorption est fixée à 36 heures pour une teneur en eau de 100 ppm, tandis que la phase de régénération dure 19 heures [6]. Or, les mesures récentes révèlent que les teneurs actuelles dans le GPL sont souvent inférieures à 25 ppm. Cette baisse notable entraîne un fonctionnement des lits d'adsorption en dehors de leur plage optimale, ce qui génère des pertes énergétiques et économiques non négligeables, puisque le système continue à fonctionner avec les mêmes séquences malgré une charge moins exigeante [28].

Une analyse des données enregistrées sur une période de deux mois a permis de confirmer le caractère permanent de ce déséquilibre. Le lit d'adsorption est ainsi exploité bien en deçà de sa capacité réelle, ce qui réduit l'efficacité globale du processus [29].

Les résultats trouvés sont représentés sur le graphe ci-dessous figure 4

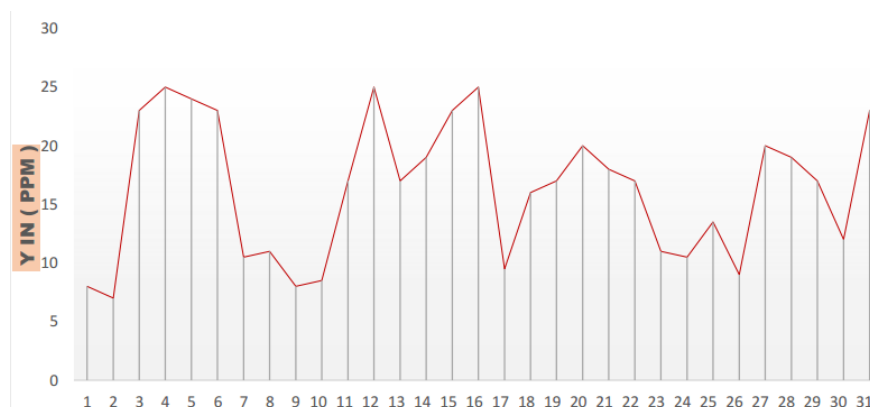


Figure III. 1: La variation de la teneur en eau durant les moi 2024

Interprétation de graphe :

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

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

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

1. la prolongation du temps d'adsorption.
2. la réduction du temps de régénération.

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

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

❖ Optimisation de la section de déshydratation de la charge**III .1 Introduction :**

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

Pour cela, la partie calcul comprend :

- Un bilan thermique.
- Un bilan de matière.

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

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

III.2 Constitution d'un déshydrateur de charge : [16], [30]

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

En général des treillis métalliques, des grilles et des tiges sont utilisés pour supporter le tamis moléculaire. La fiche technique du tamis moléculaire est représenté sur le Tableau III.1 : [16]

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

Diamètre nominal des pores	4°A
Diamètre des particules	1.6 mm
Densité tassée	700 kg / m ³
Chaleur de désorption de l'eau	1800 BTU / Lb d'eau
Teneur en eau résiduelle	2%
Capacité en eau à l'équilibre	22%
Capacité calorifique	0.22 k cal / kg °C

III .3 Les conditions opératoires d'adsorption / désorption (cas réel) : [16]

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

Réchauffage = 11 heures.

Refroidissement = 5 heures.

III .4 Température d'entrée du gaz de régénération : [16]

Réchauffage T = 280°C.

Refroidissement T= 12.7°C.

III.5 LA THEORIE DE CALCUL : [31].

III.5.1 Le Bilan Energétique :

III.5.1.1 Calcul de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération :

La quantité de chaleur nécessaire à la régénération est :

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

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

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

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

Q_{pertes} : Considérées comme étant égales à 10% de la somme
 (Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des}) (BTU).

III.5.1.2 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 :

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

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

III.5.1.3 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis Q_{tamis} :

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

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

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

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

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

III.5.1.8 Calcul de la chaleur fournie par le four par H_f /cycle :

$$H_{f/cycle} = \frac{(3 * H_f * t_r)}{C_{cycle}} \text{ et on a cycle} = 3 * t_{ads} \text{ donc :}$$

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

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

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

III.5.1.9 Calcul du temps de refroidissement du tamis « t_{ref} » :

$$t_{ref} = \frac{(Q_{tamis} + Q_{acier})}{Q_{total}} * t_r \dots\dots\dots (III.10)$$

III.5.1.10 Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref} :

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

III.5.2 Le bilan de matière de la régénération : [32]

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

Le débit du gaz de refroidissement est calculé comme suit :

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

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

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

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

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

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.

III.5.3 Calcul de la chute de pression : [32]

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

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

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, B = 0.0000889.

III.5.4 Calcul du nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds est calculé par la formule suivante :

$$Re = \frac{(G * Dp)}{\mu} \dots\dots\dots (III .14)$$

III.6 Validation de méthode :

Introduction :

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

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

Nous reprendrons essentiellement le calcul de la quantité de chaleur nécessaire à la régénération ainsi que le débit approprié.

Propriété du GPL

- Débit de traitement à 100% : Q = 240 m³/ hr = 127,2 t / hr
- P =30.7 Kg / cm²
- T =25 °C.

La composition de la charge du GPL est représentée sur le tableau III .2 :

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

Composant	Mi g/mole	Yi (%molaire)	Yi * Mi
C1	16,043	0, 30	0,05
C2	30,070	1, 95	0,59
C3	44,097	62,28	27,46
i-C4	58,123	11, 52	6,70
n-C4	58,123	23, 14	13,45
i-C5	72,150	0, 60	0,46
n-C5	72,150	0, 05	0,12

Poids moléculaire du GPL :

$$M_{GPL} = \sum Y_i * M_i$$

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

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

III.6.1 Dimensionnement d'un déshydrateur : [32]

III.6.1 Calcul de la quantité d'eau adsorbée :

➤ Diamètre minimum du lit :

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

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

D min : Diamètre minimum du lit de tamis (ft).

ρ GPL : Masse volumique de la charge (Lb/ ft³).

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

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

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

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

D p : Diamètre moyen des particules du tamis (ft).

ρ tamis : Masse volumique du dessicant (Lb/ ft³)

C : Constante relative aux tamis moléculaire (C =g*0,03291925=1.06 ft / sec²)

AN:

Dp = 0,01ft.

ρ tamis = 640 kg / m³ = 39,95 Lb / ft³.

ρ GPL =530 kg / m³ = 33.09 Lb / ft³. g =32.2 ft / sec². C= 1.06

$$G = 3600 * \sqrt{1,06 * 33,09 * 39,95 * 0,01}$$

$$G = 13476,05 \text{ Lb/ft}^2 \cdot \text{hr}$$

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 * 33,09 * 8657,09}{3,14 * 13476,05}}$$

$$D_{\min} = 5,21 \text{ ft} = 1,59 \text{ m.}$$

• **La hauteur totale du lit :** [32]

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

Avec :
$$H_t = H_s + H_z \dots \dots \dots \text{(III .17)}$$

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

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

• **Calcul de la vitesse actuelle d'écoulement de fluide (U_{act}) :** [32]

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

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

AN:
$$S = \frac{3,14 * (5,9)^2}{4} \qquad \qquad \qquad \mathbf{S=21,31ft^2.}$$

$$U_{act} = \frac{8657,09}{21,31} \qquad \qquad \qquad \mathbf{U= 407,29 (ft/hr) = 6,79 ft/min.}$$

• **Calcul le débit d'eau :**

$$q_w = \frac{4 * Y_{in} * Q * \rho_{GPL}}{\pi * D_L^2} \qquad \qquad D_L = 2,1m = 6,89ft. \qquad Y_{in} = 0,0001$$

$$Q = 8657,09 \text{ ft}^3/\text{h}. \quad \rho_{GPL} = 530 \text{ Kg/m}^3 = 33,09 \text{ Lb/ft}^3$$

$$q_w = \frac{4 * 0,0001 * 8657,09 * 33,09}{3,14 * (6,89)^2}$$

$$\mathbf{q_w = 0,77 \text{ Lb/ft}^2 \cdot \text{hr}}$$

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

$$H_z = \frac{A * q_w^{0,7895}}{U_{act}^{0,5506} * R_s^{0,2646}}$$

$$H_z = \frac{225 * 0,77^{0,7895}}{407,29^{0,5506} * 100^{0,2646}}$$

$$\mathbf{H_z = 1,57ft = 18,85inch = 0,48m.}$$

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

q_w : quantité d'eau dans le gaz par unité de surface du déshydrateur [$q_w=0,77 \text{ lb/hr.ft}^2$]

R_s : Saturation relative du gaz d'entrée en % [100% pour notre cas] ($R_s=100\%$).

U_{act} : vitesse superficielle du gaz [ft/mn] ($U_{act}=407,29\text{ft/hr}$).

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

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

$$H_s = 5,9 - 1,57 \qquad \qquad \qquad \mathbf{H_s = 4,33ft = 1,32m.}$$

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

H_z : la hauteur de la zone de transfert de masse ($H_z = 1,57\text{ft}$).

• **Estimation de la capacité d'adsorption à l'équilibre :** [32]

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

$$X_s = (22 - X_1)$$

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

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

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

Coefficient d'usure = 70 % La capacité sera en fin de compte égale à :

$$X_s = (22 - X_1) * C_{usure}$$

$$X_s = (22 - 1,5) * 0,7$$

Alors : **$X_s = 14,35 \text{ Lb d'eau / 100 Lb adsorbant.}$**

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

$$X = X_S * \left(1 - \frac{C_{emp} * H_Z}{H_S}\right)$$

$$X = 14,35 * \left(1 - \frac{0,45 * 0,48}{1,32}\right)$$

Alors :

X=12,01 Lb d'eau / 100Lb adsorbant.

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

$$M_{ads} = \frac{(H_t - (C_{emp} * H_Z)) * (X_S * D_L^2 * \rho_{tamis})}{127,38}$$

Alors :

$$M_{ads} = \frac{(5,9 - (0,45 * 1,57)) * (14,35 * (6,89)^2 * 39,95)}{127,38}$$

Donc : **$M_{ads} = 1,07 \times 10^3$ Lb.**

- Calcul du temps d'adsorption :

$$t_{ads} = \frac{0,01 * X * H_t * \rho_{tamis}}{q_w}$$

$$\text{Alors : } t_{ads} = \frac{0,01 * 12,01 * 5,9 * 39,95}{0,77}$$

Donc : **$t_{ads} = 36,21$ hr.**

- Détermination de l'efficacité d'adsorption :

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

$$\text{Alors } \text{Eff} = \frac{12,01}{14,35}$$

Donc **Eff= 0,836**

Eff=83,68%

III.6.2 Calcul du bilan thermique : [32]

III.6.2.1/ Propriété du gaz de régénération : [33]

III.6.2.1.1 / La composition du gaz de régénération : cas réel

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

Composant	X _i en mole	M _i (g/mole)	X _i * M _i	T _{ref} (°k)	T _{rech} (°k)	ΔH° (KJ/Kg)	X _i % en poids	ΔH° * X _i
C ₁	0,8386	16,000	0,1342	285,65	553,15	567,84	0,717	407,14
C ₂	0,0743	30,000	0,0223	285,65	553,15	353,55	0,119	42,07
C ₃	0,0186	44,000	0,0082	285,65	553,15	294,27	0,044	12,94
i-C ₄	0,0026	58,000	0,0015	285,65	553,15	262,63	0,008	2,10
n-C ₄	0,0008	58,000	0,0005	285,65	553,15	284,99	0,002	0,57
i-C ₅	0,0040	72,000	0,0029	285,65	553,15	257,95	0,015	3,87
n-C ₅	0,0009	72,000	0,0006	285,65	553,15	275,88	0,003	0,83
C ₆	0,0003	86,000	0,0003	285,65	553,15	309,97	0,001	0,31
N ₂	0,0557	28,000	0,0156	285,65	553,15	277,87	0,083	23,06
CO ₂	0,0024	44,000	0,0011	285,65	553,15	187,28	0,006	1,12
He	0,0018	4,000	0,0001	285,65	553,15	0,00	0,000	0,00
	1,0000		0,1871			3072,23	1,0000	494,01

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

$$M_{GN} = 0,1871 / 100$$

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

- Le gaz naturel de Réchauffage : $T = 280\text{ °C} = 253\text{K}$ $P = 4.5\text{ kg / cm}^2$
- Le gaz naturel de Refroidissement : $T = 12.7\text{ °C} = 285,85\text{K}$ $P = 4.5\text{ kg / cm}^2$.

• **Calcul de la masse volumique du GN dans les conditions normal ρ_{GN} :**

Les conditions normal $T=0\text{ °C}$, $P=1\text{ atm}$

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

$$\rho = \frac{1 \cdot 18,71}{1 \cdot 0,0821 \cdot 273,15}$$

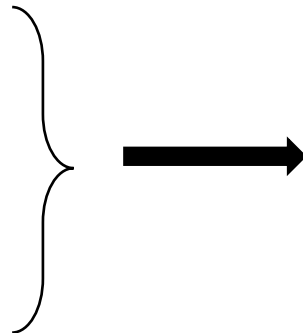
$Z = 1.$

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

$T = 0\text{ °C} = 273.15\text{ °K.}$

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

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



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

• **Calcul de l'enthalpie de chauffage du gaz de 12.7 °C à 280 °C [30]**

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

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

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

ΔH : l'enthalpie qui fournit par le four exprimé en (Kj / Kg), Tableau (1).

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

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

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

- Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q tamis
 - Calcul de la masse du tamis m_t :

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

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

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

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

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

- Calcul de la température moyenne du lit en fin de chauffage : [32]

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

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

D'après l'équation (III.6) :

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

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

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

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

$$T = 253.5 \text{ }^\circ\text{C} = 487.9 \text{ }^\circ\text{F} = 526 \text{ }^\circ\text{K.}$$

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

D'après l'équation (III.3) :

$$Q_{tamis} = m_t * C_{pt} * \Delta T$$

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

$$= 10257,56 * 0,22 * (487,9 - 77)$$

$$Q_{tamis} = 928296,57 \text{ BTU} = 9,28 * 10^5 \text{ BTU.}$$

- Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage de l'acier :
- Calcul du volume de l'acier (V_c) : [32]

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

Avec :

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

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

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

L : La hauteur de la colonne (ft).

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

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

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

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

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

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

- Calcul de la masse de l'acier m_c :

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

ρ_{acier} : La masse volumique de l'acier (Lb / ft³) = 500 Lb / ft³.

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

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

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

$$\text{Donc : } m_c + \frac{m_c * 35}{100} = 27250,92$$

$$m_c = 2.7 * 10^4 \text{ Lb.}$$

C_{pc} : La capacité calorifique de l'acier (BTU / lb. °F) = 0.12 BTU / Lb. °F [15]

$$m_c = 2.7 * 10^4 \text{ Lb.}$$

D'après l'équation (III -4) :

$$T = 253.5 \text{ } ^\circ\text{C} = 487.9 \text{ } ^\circ\text{F} = 526 \text{ } ^\circ\text{K}.$$

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

$$\begin{aligned} Q_{acier} &= m_c * C_{p_c} * (T - T_{ads}) \\ &= 2,7 * 10^4 * 0,12 * (487,9 - 77) \end{aligned}$$

$$Q_{acier} = 1331316 \text{ BTU} = 1.13 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

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

La quantité d'eau adsorbée $M_{ads} = 1,07 \cdot 10^3 \text{ Lb}$.

La chaleur de désorption $\Delta H = 2,75 * 10^2 \text{ BTU/Lb}$.

D'après l'équation (III -2) :

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

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

- Calcul des pertes de chaleur Q_{pertes} :

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

$$Q_{acier} = 1,13 * 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{tamis} = 9,28 * 10^5 \text{ BTU.}$$

D'après l'équation (III -5) :

$$\begin{aligned} Q_{pertes} &= 0,1 * (Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des}) \\ &= 0,1 * (9,28 * 10^5 + (1,13 * 10^6) + (2 * 10^6)) \end{aligned}$$

$$Q_{pertes} = 4,05 * 10^5 \text{ BTU.}$$

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

D'après l'équation (III - 1) :

$$Q_{\text{totale}} = Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}} + Q_{\text{des}} + Q_{\text{pertes}}$$

$$Q_{\text{totale}} = 4,46 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

- Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage H_f : [32]
- Calcul de l'efficacité thermique du four $1/\varepsilon$: [30]

Efficacité thermique du four pendant le réchauffage :

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

$$\varepsilon = 2,25 + (0,03113 * 11)$$

T : Temps de chauffage (hr).

$$\varepsilon = 2,5$$

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

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

$$H_f = \frac{Q_{\text{Totale}}}{\frac{1}{\varepsilon}}$$

$$1/\varepsilon = 0,40$$

$$H_f = \frac{4,46 \cdot 10^6}{0,4} = 11150000$$

$$Q_{\text{totale}} = 4,46 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

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

- Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr » : [32]

Les données sont représentées dans le tableau III.4

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

Quantité de chaleur apportée par le GN : H_f (BTU)	$1.1 \cdot 10^7$
Déférence de L'enthalpie ($\Delta H_{(280-12.7)^\circ\text{C}}$: BTU / Nm ³)	1179,47
Masse volumique ρ_{GN} (Lb/ Nm ³)	1,8298
Température finale (T_f : °F)	536
Température initiale (T_i : °F)	54,86

Pour ΔH en Kj / Nm³ : $\Delta H = \Delta H \text{ (Kj/ Kg)} * \rho_{GN}$

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

$$\rho_{GN} = 0,83 \text{ Kg/ Nm}^3 = 1,83 \text{ Lb/ Nm}^3.$$

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

D'après l'équation (III -8) :

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

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

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

$$t_r = 10,34 \text{ hr.}$$

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

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

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

ΔH (Te-Tads) : La différence de l'enthalpie du gaz (BTU / Nm³).

- **Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle « H_f /cycle » : [32]**

$$t_r = 10,34 \text{ hr.}$$

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

$$t_{ads} = 36,21 \text{ hr.}$$

D'après l'équation (III -9) :

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

$$H_f / \text{cycle} = 3,14 \cdot 10^6 \text{ BTU / hr.}$$

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

D'après l'équation (III -10) :

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

Q totale = 4,46 10⁶ BTU.

Q acier= 1,13 10⁶ BTU.

t_{ref} = 4,77 hr.

Q tamis = 9,28 10⁵ BTU.

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

D'après l'équation (III -11) :

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

Q_{tamis}=9,28*10⁵BTU.

Q_{ref}=4,31*10⁵ BTU/hr.

Q_{acier}=1,13*10⁶BTU.

t_{ref}=4,77 hr.

III.6.2.2 Calcul du bilan de matière de la régénération : [32]

- Calcul du débit du gaz de refroidissement :

D'après l'équation (III -12) :

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

Q_{ref}=4,31*10⁵BTU/hr.

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

T_s=227°C=440,6°F=500°K.

T_e=12,7°C=54,86°F=285,7°K.

$$M_{ref} = \frac{4,31 * 10^5}{531,74}$$

M_{ref}=8,10*10² Nm³/hr.

- ✓ Calcul des pertes de charge : [32]
- ✓ Calcul de la perte de charge $\Delta P/L1$ pour le GN chaud :
- ✓ Le gaz naturel de Réchauffage : $T = 280 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

- Calcul de la masse volumique du GN :

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

- Calcul du coefficient de compressibilité (Z) :

Le facteur de compressibilité est calculé par la formule suivante :

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

$$Z = 1,04 \text{ Kg/m}^3.$$

Avec P est la pression du travail exprimé en Psia.

$$Z = 1,04 \text{ Kg/m}^3.$$

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

$$\rho_{GN} = \frac{4,44 * 18,71}{1,04 * 0,082 * 553}$$

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

$$\rho_{GN} = 1,76 \text{ Kg/m}^3 = 0,11 \text{ Lb/ft}^3.$$

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

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

- Calcul de la vitesse superficielle U_1 à travers le lit : [32]

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

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

$$S = 37,27 \text{ ft}^2.$$

$$\rho_{GN} = 1,76 \text{ Kg / Nm}^3 = 0,11 \text{ Lb / ft}^3.$$

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

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

$$U_1 = 14,96 \text{ ft/min.}$$

➤ **Calcul de la viscosité du GN chaud μ_1 :**

Connaissant la densité relative dr et la pression de régénération :

$$P = 4,5 \text{ kg / cm}^2 = 450 \text{ Kpas} \qquad dr = \frac{M_{GN}}{M_{air}} = 0,64 \text{ft/min.}$$

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

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

D'après l'équation (III -13) :

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

Avec :

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

μ_1 : Viscosité du GN (Cp).

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

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

$$\Delta P/L_1 = 0,03 \text{ psi / ft.}$$

• **Calcul de Re_1 :**

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

$$\mu_1 = 0,02 \text{ Cp} = 0,04 \text{ Lb /ft .hr.}$$

$$G = Mg / S = 98,74 \text{ Lb/ ft}^2 \cdot \text{hr.}$$

D'après l'équation (III -14)

$$Re_1 = \frac{G * D_p}{\mu}$$

$$Re_1 = 170,09$$

- Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_2$ pour le GN froid : [32]
 - Calcul du coefficient de compressibilité (Z) : [27], [33]

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

Tableau III. 5: La composition du gaz de régénération.

Composant	M _i (g/mole)	Y _i (%molai re)	T _{ci} (°C)	Y _i *T _{ci}	P _{ci} (atm)	Y _i *P _{ci}
C ₁	16,043	0,30	-82,588	-0,25	45,387	0,14
C ₂	30,070	1,95	32,261	0,63	48,162	0,94
C ₃	44,097	62,28	96,622	60,18	41,848	26,06
i-C ₄	58,123	11,52	134,672	15,51	35,921	4,14
n-C ₄	58,123	23,14	151,95	35,28	37,344	8,64
i-C ₅	72,150	0,60	187,2	1,12	33,370	0,20
n-C ₅	72,150	0,05	196,5	0,098	33,213	0,016

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

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

T_c, P_c : paramètres pseudo critiques.

T_r, P_r : température et pression réduites.

$$T_c = \sum Y_i * T_{ci} \quad T_c = 387,984^\circ\text{K.}$$

$$P_c = \sum Y_i * P_{ci} \quad P_c = 40 \text{ atm.}$$

$$Z = f(T_r = 1,42 ; P_r = 0,1).$$

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

$$Z = 0,91$$

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

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

$$\rho_{GN} = 3.89 \text{ Kg / m}^3.$$

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

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

- **Calcul de la vitesse superficielle U_2 à travers le lit : [32]**

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

$$S = 37,28 \text{ ft}^2.$$

$$\rho_{GN} = 3.89 \text{ Kg / m}^3 = 0.24 \text{ Lb / ft}^3.$$

$$M_g = M_{ref} = 760 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1.4 \cdot 10^3 \text{ Lb / hr.}$$

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

$$U_2 = 17.96 \text{ ft / min.}$$

- **Calcul de la viscosité du GN froid μ_2 :**
- **Calcul de la densité relative d_r :**

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

$$d_r = 0.64$$

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

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

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

D'après l'équation (III -13)

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

$$\Delta P / L_2 = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ psi / ft.}$$

❖ Calcul de Re_2 : [24]

$D_p = 0,01$ ft. (Voir annexe B).

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

$G = Mg/S = 258,73$ lb/ft².hr.

D'après l'équation (III -14) :

$$Re_2 = \frac{G * D_p}{\mu}$$

$Re_2 = 86,24$.

III.6.2.3 Récapitulation des résultats :

Les résultats sont représentés sur le tableau III.6

Tableau III. 6: Représentation des valeurs de design et des valeurs calculées.

Les valeurs calculées	Les valeurs de design
$m_t = 4652,75$ kg	$m_t = 4653$ kg
$H_t = 2,1$ m	$H_t = 2,1$ m
$H_f = 2.72 * 10^6$ Kcal /hr	$0,15 * 10^6 < H_f < 3,3 * 10^6$ Kcal /hr
$t_r = 10,34$ hr	$t_r = 11$ hr
$t_{ref} = 4,77$ hr	$t_{ref} = 5$ hr
$Mg = 2000$ Nm ³ /hr $M_{ref} = 810$ Nm ³ /hr	$1000 < \text{Débit} < 2500$ Nm ³ /hr
$\Delta P1 / L = 0,22$ psi /ft $\Delta P2 / L = 0,017$ psi /ft	$0,01 < \Delta P / L < 0,25$ psi /ft
$Re_1 = 170,09$	$Re > 100$
$T_{ads} = 36,80$ hr	$T_{ads} = 36$ hr

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

En effet la perte de charge se trouve dans l'intervalle recommandé où on peut effectuer l'opération de régénération sans soulever le lit, ainsi que la quantité de chaleur fournie par le four.

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

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

III.7 Etude de la première solution : [32]

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

III .7.1 Calcul le débit d'eau :

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

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

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

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

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

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

$q_w = 1,30 \text{ (Lb/ft}^2 \cdot \text{hr)}$.

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

III .7.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse : [32]

$$H_z = \frac{A * q_w^{0,7895}}{U_{act}^{0,5506} * R_S^{0,2696}}$$

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

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

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

$$H_z = 9,09 \text{ inch} = 0,75 \text{ ft} = 0,23 \text{ m.}$$

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

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

$$H_s = H_t - H_z$$

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

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

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

$$H_s = 5,15 \text{ ft} = 1,57 \text{ m}$$

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

III .7.4 Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads} : [32]

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

$$M_{ads} = 1187,69 \text{ Lb.}$$

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

ρ_{tamis} : Masse volumique du tamis.

C : Constante relative aux tamis moléculaire.

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

III .7.5 Calcul du temps d'adsorption :

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

$$t_{ads} = 164 \text{ hr.}$$

Y in : la teneur en eau dans la charge de GPL.

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

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

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

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

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

X = 13,40 Lb d'eau / 100 Lb de dessicant.

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

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

EFF = 93,36.

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

III .8 Calcul du bilan thermique : [32]

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

La quantité d'eau adsorbée M_{ads} = 1188,43Lb.

La chaleur de désorption ΔH = 1800 BTU/Lb.

D'après l'équation (IV-2) :

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

Q_{des} = 2,14 10⁶ BTU.

- Calcul des pertes de chaleur Q_{perte} :

D'après l'équation (III.5) :

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

$$Q_{\text{acier}} = 1,13 * 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 9,28 * 10^5 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{des}} = 2,14 * 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{perte}} = 4,20 * 10^5 \text{ BTU.}$$

- Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale} : [32]

D'après l'équation (III -1) :

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

$$Q_{\text{totale}} = 4,61 * 10^6 \text{ BTU.}$$

- Calcul de la chaleur fournie par le four H_f : [30]

D'après l'équation (III -7) :

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

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

$$H_f = 1,21 * 10^7 \text{ BTU / hr.}$$

$$Q_{\text{totale}} = 4,61 * 10^6 \text{ BTU.}$$

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

D'après l'équation (III -8) :

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

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

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

$$H_f = 1,21 * 10^7 \text{ BTU / hr.}$$

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

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

$$\text{tr} = 12,04 \text{ hr.}$$

- **Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle H_f / CYCLE :** [14]

$$t_r = 11,14 \text{ hr.}$$

$$H_f = 1,12 * 10^7 \text{ BTU / hr.}$$

$$t_{\text{ads}} = 164 \text{ hr.}$$

D'après l'équation (III -9) :

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

$$H_f/\text{Cycle} = 7,61 * 10^5 \text{ BTU / hr.}$$

- ❖ **Calcul du temps de refroidissement du tamis « t_{ref} » :** [32]

D'après l'équation (III -10) :

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

$$Q_{\text{totale}} = 4,61 * 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1,13 * 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 9,28 * 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_r = 12,04 \text{ hr.}$$

$$t_{\text{ref}} = 5,37 \text{ hr.}$$

- **Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref} :** [32]

D'après l'équation (III -11) :

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

$$Q_{\text{acier}} = 1,13 * 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 9,28 * 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_{ref} = 5,37 \text{ hr.}$$

$$Q_{ref} = 3,83 \cdot 10^5 \text{ BTU / hr.}$$

III .8 .1 Calcul du bilan de matière de la régénération : [32]

❖ Calcul du débit du gaz de refroidissement :

D'après l'équation (III -12) :

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

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

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

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

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

$$Q_{ref} = 3,83 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr.}$$

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

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

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

$$M_{ref} = 760 \text{ Nm}^3/\text{hr.}$$

III .8 .2 Calcul des pertes de charges :

- Calcul de la perte de charge $\Delta P/L1$ pour le GN chaud : [32]
- Calcul de la vitesse superficielle U_1 à travers le lit :

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

$$S = 37,28 \text{ ft}^2.$$

$$\rho_{GN} = 1,76 \text{ Kg / m}^3 = 0,11 \text{ Lb / ft}^3.$$

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

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

$$U_1 = 14,96 \text{ ft / min.}$$

• **Calcul de la viscosité du GN chaud μ_1 : [32]**

Connaissant la densité relative d_r et la pression de régénération :

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

$$d_r = M_{GN} / M_{air} = 0,64 \quad T = 280 \text{ }^\circ\text{C.}$$

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

D'après l'équation (IV -13) :

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

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

μ_1 : la viscosité du GN (Cp).

U_1 : 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.

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

$$\Delta P/L_1 = 0.019 \text{ psi/ft} = 0,02 \text{ psi/ft.}$$

• **Calcul de Re 1 :**

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

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

$$G = M \text{ g} / S = 680,37 \text{ Lb /ft}^2 \text{ .hr}$$

D'après l'équation (IV -14) :

$$Re_1 = \frac{G * D_p}{\mu}$$

$$Re_1 = 170,09$$

❖ Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_2$ pour le GN froid : [32]

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

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

$$S = 37,28 \text{ ft}^2.$$

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

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

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

$$U_2 = 2,60 \text{ ft} / \text{min}.$$

• Calcul de la viscosité du GN froid μ_2 :

Connaissant la densité relative d_r et la pression de régénération :

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

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

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

D'après l'équation (IV -13) :

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

$$\Delta P/L_2 = 4,44 \cdot 10^{-3} \text{ psi} / \text{ft}.$$

• Calcul de Re_2 :

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

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

$$Re_2 = \frac{G \cdot D_p}{\mu_2}$$

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

$$Re_2 = 86,24.$$

III .8 .3 Interprétation des résultats :

D'après tous les résultats obtenus, on a réalisé le but de notre travail en modifiant le temps d'adsorption du déshydrateur de charge de 36 heures (le temps de design), au temps obtenu après les calculs qui correspond à 164 heures.

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

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

III .9 Etude de la deuxième solution :

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

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

III .9.1 Calcul de débit d'eau : [25]

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

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

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

ρ_{GPL} : Masse volumique de la charge (Lb/ft^3) ($\rho_{GPL} = 530 \text{ Kg/m}^3 = 33,086 \text{ Lb/ft}^3$).

Q : Débit volumique de la charge (ft^3 / hr). ($Q = 240 \text{ m}^3/\text{hr} = 8475,524 \text{ ft}^3/\text{hr}$).

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

$$q_w = 1,32 \text{ (Lb/ft}^2 \cdot \text{hr)}.$$

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

III .9.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse : [32]

$$H_z = \frac{A * q_w^{0,7895}}{U_{act}^{0,5506} * R_s^{0,2646}}$$

Avec: $U_{act} = \frac{Q}{S} = \frac{8475,524}{37,28}$

$U_{act} = 227,34 \text{ ft/hr.}$

q_w : le débit d'eau en Lb/ft².hr. ($q_w = 1,3$ (Lb/ft².hr).

U_{act} : la vitesse actuelle d'écoulement de fluide. ($U_{act} = 227,34 \text{ ft/hr}$)

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

$H_z = 9,09 \text{ inch} = 0,75 \text{ ft} = 0,23 \text{ m.}$

III .9.3 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre :

$$H_s = H_t - H_z$$

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

H_z : la longueur de la zone de transfert de masse (ft). ($H_z = 1,29 \text{ ft}$)

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

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

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

III .9.4 Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads} : [32]

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

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

Q_v : Débit volumique du produit = 8675,524 (ft³ / hr)

ρ_{GPL} : Masse volumique de la charge = 33,09 (lb / ft³)

θ : le temps d'adsorption = 36 (hr)

$M_{ads} = 258,4 \text{ Lb.}$

III .9.6 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant**(X) :**

$$X = X_S * \left(1 - \left(\frac{C * H_Z}{H_S}\right)\right)$$

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

$H_Z = 0,75 \text{ ft.}$

$H_S = 5,15 \text{ ft.}$

$X = 13,39 \text{ Lb d'eau / 100 Lb de dessicant.}$

III .9.7 Détermination de l'efficacité d'adsorption :

$$X = 13,39 \quad \text{EFF} = \frac{X}{X_S}$$

$X_S = 14,35$

EFF = 0,93.

III .9.8 Calcul du bilan thermique : [32]

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

La quantité d'eau adsorbée $M_{\text{ads}} = 258,4 \text{ Lb.}$

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

D'après l'équation (IV -2) :

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

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

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

$Q_{\text{acier}} = 1,13 * 10^6 \text{ BTU.}$

$Q_{\text{tamis}} = 9,28 * 10^5 \text{ BTU.}$

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

D'après l'équation (IV -5) :

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

$Q_{\text{pertes}} = 2,5 * 10^5 \text{ BTU.}$

- Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q totale : [32]

D'après l'équation (IV -1) :

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

$$Q_{totale} = 2,7 * 10^6 \text{ BTU.}$$

- Calcul de la chaleur fournie par le four H_f : [33]

D'après l'équation (III -7) :

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

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

$$H_f = 6,92 * 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{totale} = 2,7 * 10^6 \text{ BTU.}$$

- Calcul du temps de réchauffage du tamis « t_r » : [32]

D'après l'équation (III -8) :

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

$$H_f = 6,92 * 10^6 \text{ BTU}$$

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

$$t_r = 6,86 \text{ hr.}$$

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

- Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle H_f/CYCLE : [32]

$$t_r = 6,86 \text{ hr.}$$

$$H_f = 6,92 * 10^6 \text{ BTU.}$$

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

D'après l'équation (III.9) :

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

$$H_{f/cycle} = 1,32 * 10^6 \text{ BTU.}$$

- Calcul du temps de refroidissement du tamis « t ref » :

D'après l'équation (III.10) :

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

$$Q_{totale} = 2,7 * 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{acier} = 1,13 * 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{tamis} = 9,28 * 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_{ref} = 5,22 \text{ hr.}$$

$$t_r = 6,86 \text{ hr.}$$

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

D'après l'équation (III.11) :

$$Q_{acier} = 1,13 * 10^6 \text{ BTU.}$$

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

$$Q_{tamis} = 9,28 * 10^5 \text{ BTU.}$$

$$Q_{ref} = 3,94 * 10^5 \text{ BTU/hr.}$$

$$t_{ref} = 5,22 \text{ hr.}$$

III .9.9 Calcul du bilan de matière de la régénération : [32]

- Calcul du débit du gaz de refroidissement :

D'après l'équation (III -12) :

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

$$Q_{ref} = 3,94 * 10^5 \text{ BTU/hr.}$$

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

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

$$M_{ref} = 776,5 \text{ Nm}^3/\text{hr.}$$

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

III .9.10 Interprétation des résultats :

Selon les résultats obtenus, il est clairement apparent que la durée de régénération est modifiée, une diminution du temps de chauffage jusqu'à 6 heures 86 minutes et une durée de 5 heures 22 minutes pour le refroidissement sans perturber la durée du cycle d'adsorption de 36 heures.

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

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

III .10 Interprétation et choix de la solution optimale :

D'après tous les Résultats obtenus, On ne peut optimiser le fonctionnement de la Section de déshydratation de la charge, que par la réalisation de la solution optimale du problème posé qui est : l'augmentation du temps d'adsorption du sécheur.

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

- ❖ Une diminution de gaz naturel consommé lors de la régénération de la séquence de refroidissement.
- ❖ Une diminution de la Chaleur fournie par le four pour la séquence de chauffage, Calculée à la base d'une saturation totale du lit, parce que si l'on chauffe un lit qui n'est que partiellement rempli d'eau, l'énergie utilisée pour chauffer un tamis ne contenant pas d'eau est simplement perdue.
- ❖ Une augmentation de la durée de vie du tamis moléculaire.
- ❖ Une perte moins importante lors de la régénération du produit GPL piégé dans le tamis moléculaire.

III .11 Comparaison entre les deux solutions optimales :

III .11.1 Première solution :

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

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau III.7.

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

PPM	100	80	60	40	25
Temps d'adsorption	36	47,23	64,77	100,05	164
	108	141,69	194,31	300,15	492
Temps de Réchauffage Fix	11	11	11	11	11
Nombre hr / ans	8760	8760	8760	8760	8760
Débit de Réchauffage	2000	2000	2000	2000	2000
Nombre de régénération /ans	243,3333333	185,4753335	135,2477999	87,55622189	53,41463415
Débit GN	2000	2000	2000	2000	2000
Quantité de GN pour le réchauffage	22000	22000	22000	22000	22000
Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an	5 353 333,33	4 080 457,34	2 975 451,60	1 926 236,88	1 175 121,95
Gain en GN par ans et par train en Nm3		1 272 876,00	2 377 881,74	3 427 096,45	4 178 211,38

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

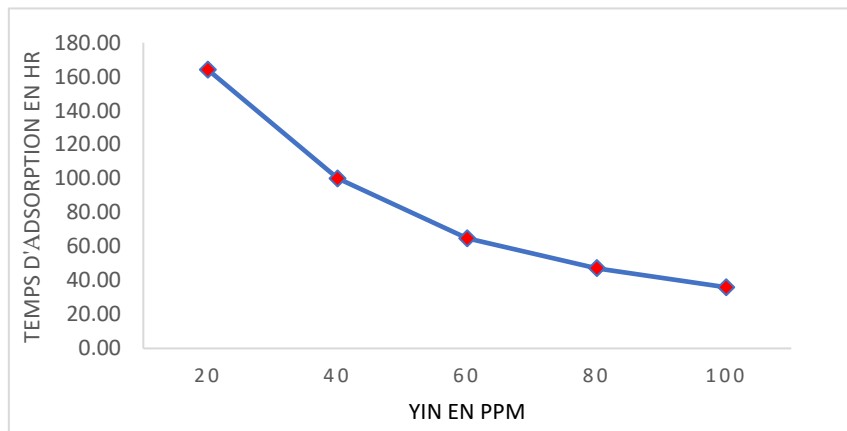


Figure III. 3: Le temps d’adsorption en fonction de la teneur en eau.

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

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

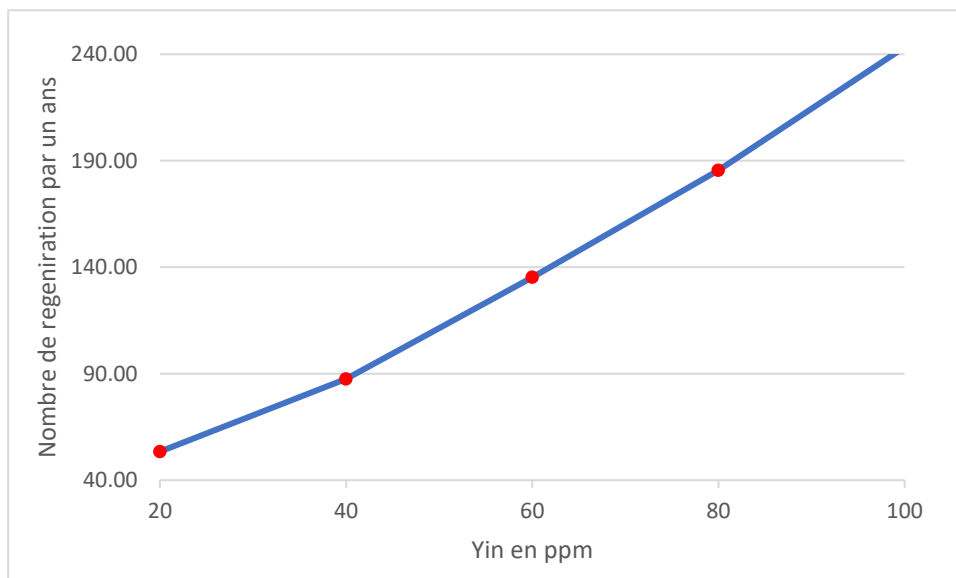


Figure III.4 : Le nombre de régénération par ans en fonction de la teneur en eau.

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

III .11.2 Deuxième solution :

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

Les résultats obtenus sont montrés par le tableau IV-7.

Tableau III. 8 : La variation du temps de régénération en fonction de la teneur en eau pour un temps d'adsorption fixe.

Teneur en eau en ppm	100	80	60	40	25
Temps d'adsorption (hr) fix	36	36	36	36	36
	108	108	108	108	108
Temps de Réchauffage	11	8,86	7,73	6,64	6,17
Nombre hr / ans	8760	8760	8760	8760	8760
Débit de Réchauffage	2000	2000	2000	2000	2000
Nombre de régénération /ans	243,3333333	243,3333333	243,3333333	243,3333333	243,3333333
Débit GN	2000	2000	2000	2000	2000
Quantité de GN pour le réchauffage	22000	17720	15460	13280	12340
Quantité de GN pour le réchauffage pendant un ans	5 353 333,33	4 311 866,67	3 761 933,33	3 231 466,67	3 002 733,33
Gain en GN par ans et par train en Nm ³	5 353 333,33	1 041 466,67	1 591 400,00	2 121 866,67	2 350 600,00

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

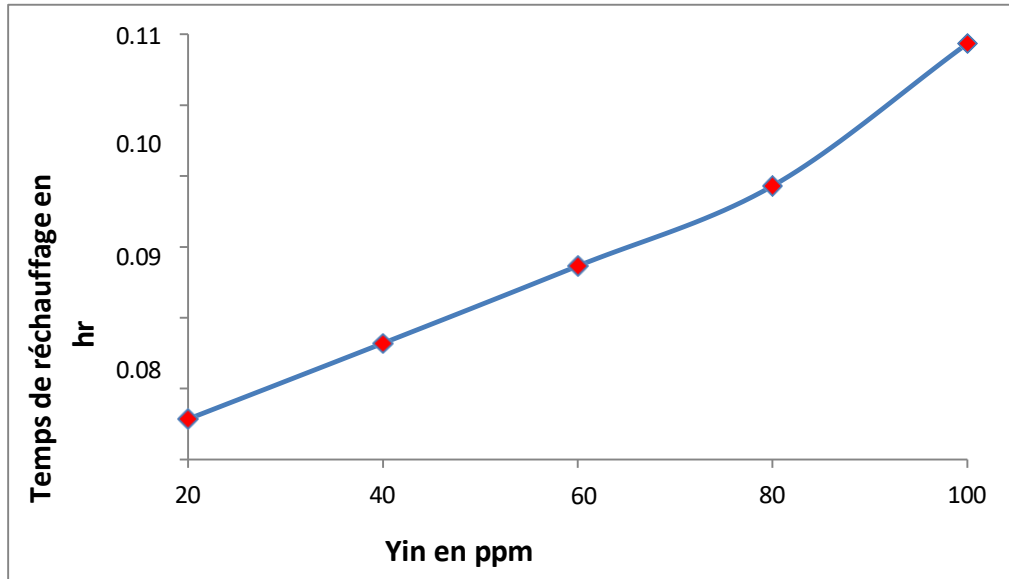


Figure III.6: Le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau.

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

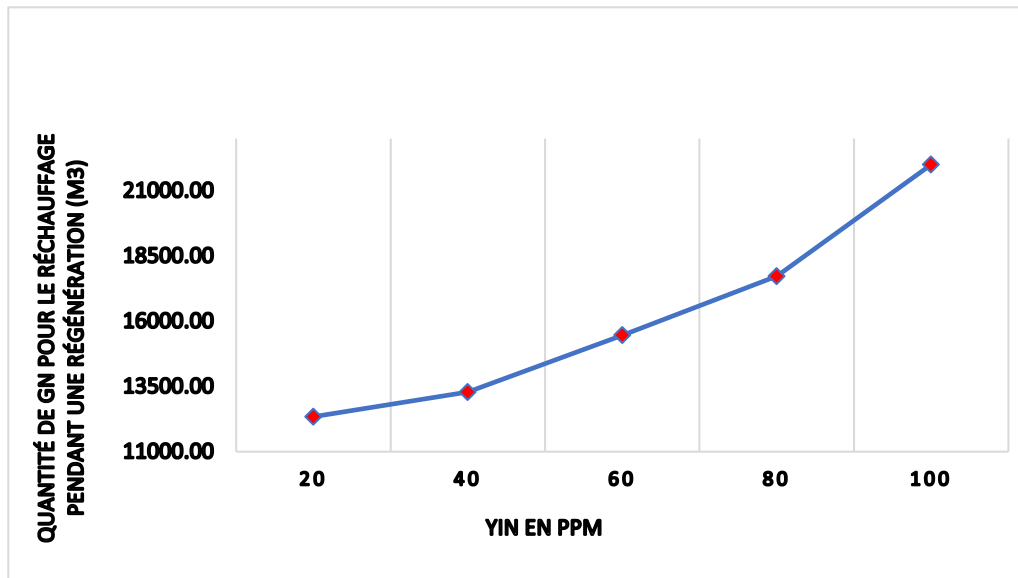


Figure III.7 : Quantité de GN utilisée pendant une régénération en fonction de la teneur en eau pour la deuxième solution.

**CHAPITRE IV Etude technico-
économique**



IV.1 Introduction :

Afin de mettre en valeur la solution optée dans ce travail, nous proposons une estimation du gain en gaz naturel, en prolongeant la durée de la phase d'adsorption jusqu'à 164 heures tout en gardant les séquences de chauffage et de refroidissement identiques aux designs. En effet, cette solution nous permet, aussi, de préserver les tamis moléculaires et d'augmenter leur durée de vie, ce qui engendre un gain supplémentaire dans l'acquisition des tamis neufs qui doit bénéficier le complexe GP1 /Z par la mise en exploitation de nos résultats.

IV.2 Etude économique des résultats de la solution optimale :

IV.2.1 Gain en gaz naturel :

Pour un cycle d'adsorption de 164 heures (pour une teneur en eau à l'entrée du déshydrateur de charge égale à 25 ppm maximal et une teneur à la sortie de l'ordre de 5 ppm on a trouvé que le temps d'adsorption s'élève à 164hr) est détaillé ci-dessous.

- Le nombre de cycle /mois = nombre d'heures par mois /durée d'un cycle.
 $= 720/164 = 04$ cycle.
- Le débit de GN durant :
 Le chauffage : $2000 \text{ Nm}^3 / \text{hr}$.
 Le refroidissement : $760 \text{ Nm}^3 / \text{hr}$.
- Le nombre de cycle actuel = $720 / 36 = 20$ cycles.
- Le nombre de cycle gagnés par mois pour un train = (nombre de cycle actuel – le nombre de cycle plus long) = $20 - 4 = 16$ cycles.
 (10,34 heures de réchauffage et 4,77 heures de refroidissement).
- Le gain en GN chaud pour un train par mois = $15 * 10,34 * 2000$
 $= 310200 \text{ Nm}^3 / \text{mois}$.
- Et pour 9 trains = $310200 * 9 = 2791800 \text{ Nm}^3 / \text{mois}$.
- Le gain en GN froid pour un train par mois = $15 * 4,77 * 760$
 $= 54378 \text{ Nm}^3 / \text{mois}$
- Et pour 9 trains = $51642 * 9 = 489402 \text{ Nm}^3 / \text{mois}$
 $1,069 \text{ Nm}^3 = 1 \text{ Contra m}^3$

- Prix unitaire du GN : $10^3 \text{ Contra m}^3 = 1341,39 \text{ DA}$
- $1\text{Nm}^3 = 1,255 \text{ DA}$
- Le gain en GN pour 9 trains par mois :
 - Le GN de chauffage : $1,255 * 2791800 = 3,4 * 10^6 \text{ DA.}$
 - Le GN de refroidissement : $1,255 * 489402 = 0,61 * 10^6 \text{ DA.}$

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

$$= (3.4 + 0.61) / 2 * 10^6 = 2.005 * 10^6 \text{ DA.}$$

- Le gain réel annuel pour 9 trains par an = $12 * 2.005 * 10^6$
= $24.06 * 10^6 \text{ DA.}$

IV.2.2 Gain en vie du tamis moléculaire :

- La quantité totale de tamis moléculaire d'un déshydrateur est de 4 653 kg D'après le coût de changement de tamis du train 200 (mars 2017) on a :
- Le prix du tamis est de 355,08DA/kg.
- Un déshydrateur revient 1 652 168 DA ($4653 * 355,08$).
- La durée de vie actuelle du tamis moléculaire est de 3 ans
- Le changement des tamis de la phase I et la phase III se fait tous les 9 ans du fait qu'il y a 3 déshydrateurs par train.
- Le changement des tamis de la phase II se fait tous les 6 ans du fait qu'il y a 2 déshydrateurs par train.
- Le coût de l'opération de changement du tamis moléculaire d'un déshydrateur chaque année revient
 - Pour la phase I 183 574,2 DA ($1\ 652\ 168 / 9$).
 - Pour la phase II 275 361,3 DA ($1\ 652\ 168 / 6$).
 - Pour la phase III 183 574,2 DA ($1\ 652\ 168 / 9$).
- Cela correspond à un cycle de 55 heures (36 heures adsorption et 19 heures de régénération) pour un sécheur.

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

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

- Le tamis moléculaire de la phase I avec le nouveau cycle reviendrait à 55072,26 DA (1 652 168 /30) soit un gain annuel de 128501,94 DA (183 574,2 - 55072,26).
- La durée de vie du sécheur dans la phase II devient : $183*6/55 = 19,9 \text{ ans} \approx 20 \text{ ans}$.

Conclusion des résultats est représentée sur le tableau **IV.1**.

Tableau IV. 1: Durée de vie et changement du tamis.

Durée d'adsorption (hr)		36	164
Durée de vie de tamis		3 ans	10 ans
Changement du tamis	Phase I et phase III	9 ans	30 ans
	Phase II	6 ans	20 ans

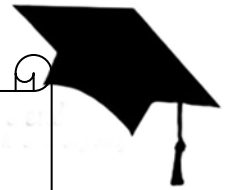
- Le tamis moléculaire de la phase II avec le nouveau cycle reviendra à 82608,4 DA (1 652 168 /20). Soit un gain annuel de 192752,9 DA (275 361,3 -82608,4).
- Le tamis moléculaire de la phase III avec le nouveau cycle reviendrait à 55072,26 DA (1 652 168 /30) soit un gain annuel de 128501,94 DA (183 574,2 - 55072,26).
- Un gain annuel total pour le complexe de 3469552.34 DA
 $[(128501,94 *12) + (192752,9 *4) + (128501,94 *9)].$

Conclusion des résultats est représentée sur le tableau IV.2

Tableau IV.3: Le gain annuel en GN et en vie des tamis pour le cycle calculé.

	Cycle calculé
Gain annuel en GN pour 9 trains en DA	2 406 0000
Gain annuel en vie des tamis pour le complexe en DA	3 469 552,34

Conclusion générale



Conclusion générale

Il est essentiel de rappeler que les sources d'énergie occupent actuellement une place importante dans notre économie nationale. Ainsi, toute perte d'énergie, quelle qu'en soit la nature ou l'ampleur, peut avoir un impact direct sur les coûts d'exploitation et la qualité des produits finis.

Dans ce contexte, la réduction de la teneur en eau dans l'alimentation constitue l'une des principales préoccupations du complexe GP1/Z, notamment à travers le fonctionnement de la section de déshydratation. Au cours de notre stage, il nous a semblé indispensable d'étudier cet aspect afin d'optimiser les conditions de fonctionnement de cette unité.

L'augmentation du temps d'adsorption permet de réaliser d'importantes économies d'énergie, car la même quantité de gaz naturel est utilisée sur une durée de cycle plus longue.

De plus, cette optimisation présente plusieurs avantages supplémentaires :

Allongement de la durée de vie du tamis moléculaire, du fait de la réduction du nombre de régénérations, ce qui diminue son exposition à des températures élevées responsables de sa dégradation.

Prolongation de la durée de vie des équipements, puisque la réduction du nombre de cycles les soumet à moins de contraintes de pression et de température (pressurisation, dépressurisation, chauffage et refroidissement).

Réduction de l'usure de la robinetterie, les séquences étant pilotées par des opérations d'ouverture et de fermeture des vannes, moins sollicitées avec un nombre réduit de cycles.

Ainsi, cette optimisation permettrait d'améliorer la performance énergétique et de réduire les coûts de manière significative, tout en maintenant la qualité du produit

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES



Références bibliographiques :

- [1] « IEA, World Energy Outlook 2023, International Energy Agency, Paris, 2023».
- [2] «A. Y. Abdelaziz, R. Saidur, and S. Mekhilef, "A review on energy saving strategies in industrial sector," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 15, no. 1, pp. 150–168, Jan. 2011.».
- [3] «C. K. Hsieh, "Energy efficiency: The other alternative fuel," J. Ind. Ecol., vol. 12, no. 4, pp. 512–515, 2008.».
- [4] «U.S. Department of Energy, Improving Energy Efficiency in Industrial Plants, 2020. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/>».
- [5] « M. Kidnay and W. Parrish, Fundamentals of Natural Gas Processing, 2nd ed., CRC Press, 2006.».
- [6] «H. Yang and A. Bahadori, "Molecular sieve dehydration for natural gas processing," J. Nat. Gas Sci. Eng., vol. 9, pp. 139–147, Jan. 2012.».
- [7] «J. Thiel and D. Lübbert, "Optimization of energy consumption in natural gas treatment plants," Energy Procedia, vol. 61, pp. 2482–2486, 2014.».
- [8] «G. McCartney and M. Crane, "Design of Molecular Sieve Dehydration Units," Oil & Gas Journal, vol. 107, no. 12, pp. 74–80, 2009».
- [9] «A. Bahadori, Natural Gas Processing: Technology and Engineering Design, Gulf Professional Publishing, 2014».
- [10] « S. Mokhatab, W. A. Poe, and J. Y. Mak, Handbook of Natural Gas Transmission and Processing, 4th ed., Gulf Professional Publishing, 2018».
- [11] «M. Kidnay and W. Parrish, Fundamentals of Natural Gas Processing, 2nd ed., CRC Press, 2006.».
- [12] «J. Thiel and D. Lübbert, "Optimization of energy consumption in natural gas treatment plants," Energy Procedia, vol. 61, pp. 2482–2486, 2014.».
- [13] Manuel opératoire ; section déshydratation Document GP1-Z.
- [14] ARBI Bouziane, optimisation du fonctionnement de la section déshydratation de charge au niveau du complexe GP1/Z session Avril 2018 /Groupe Génie de Gaz..
- [15] DATA BOOK Déshydratation and treating. Section 15, 9 ème Edition, Rev (1974 - 1976).
- [16] mécanique, Catalogue; GP1-Z, manuel : volume 1.Document.
- [17] «G. Towler and R. Sinnott, Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design, 2nd ed., Elsevier, 2013».

Références Bibliographiques

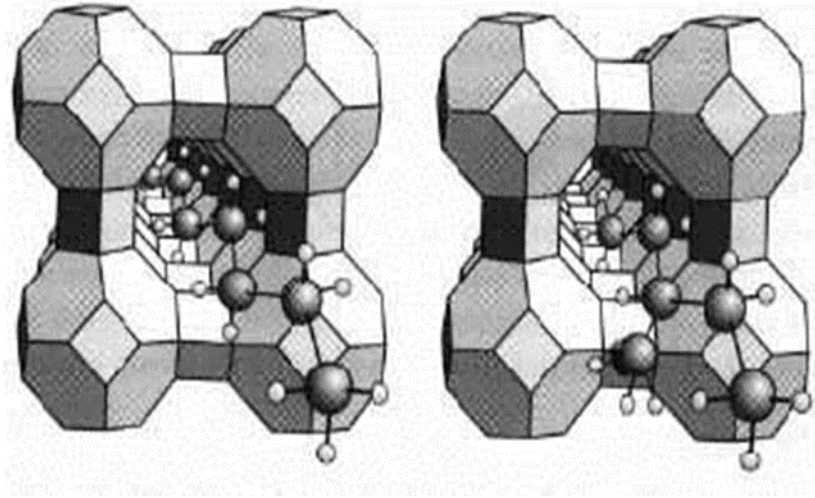
- [18] «ISA (International Society of Automation), Instrumentation and Control Systems Documentation, 3rd ed., 2004.».
- [19] «R. W. Eckman, Industrial Instrumentation, Wiley, 2011».
- [20] Révision, Le process de la déshydratation du Gaz Manuel de formation. Cours EXP-Pr-Pr130.
- [21] Sévie”., Polycopie I.A.P “ propane liquide déshydratation usine moléculaire.
- [22]]. Mémoire Présente pour l'obtention du diplôme de magister, l'option traitement du GPL et du GAZ par HAFANI MUSTAFA, thème problème recentrées dans le séchage du gaz naturel..
- [23] GLA/HBK)., Mémoire : étude de l'effet de changement du diamètre des tamis moléculaires sur le système de séchage (unité.
- [24] tamis, Mémoire présente par Mme BELARBI KHEIRA LAMIA en vue l'obtention du diplôme de Magister Thème : recyclage des matériaux de l'industrie pétrolière : cas des.
- [25] Arthur J. Kidnay, William R. Parrish, natural Gas Processing page 2(2006)..
- [26] Grace, les tamis moléculaires caractéristiques et application Western Germany, Juin 1980.
- [27] Déshydratation on Bloc 11, module 3..
- [28] « M. Kidnay and W. Parrish, Fundamentals of Natural Gas Processing, 2nd ed., CRC Press, 2006».
- [29] «J. Thiel and D. Lübbert, “Optimization of energy consumption in natural gas treatment plants,” Energy Procedia, vol. 61, pp. 2482–2486, 2014».
- [30] d’ingénieur, Formation perfectionnement.
- [31] DATA BOOCK, Engineering.
- [32] M, RUTHVEN D.; and, Principles of Adsorption Adsorption Process John Wiley et sons, New York..
- [33] Sherwood; Liquids., Proprieties of Gaz and.

ANNEXES



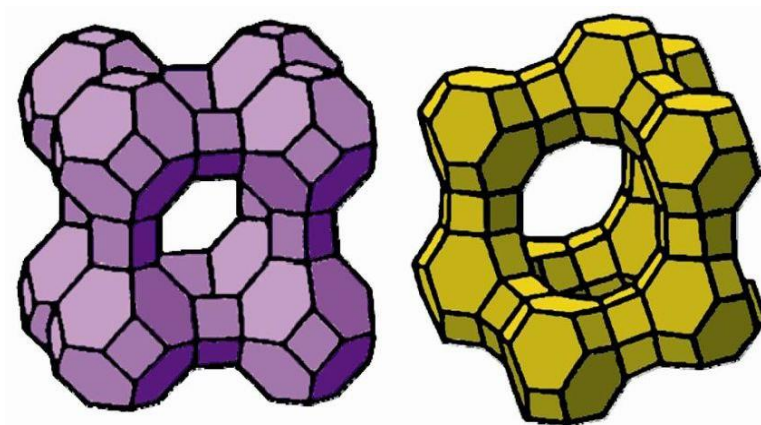
Annexe A : Structure des tamis moléculaires

Tamis moléculaires



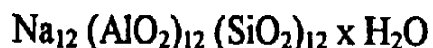
Structure de zéolithe de type A

Structure de zéolithe de type X



Annexe B : PROPRIETES PHYSIQUE DE L'ADSORBANT (TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES)

CHEMICAL FORMULA



Conditions d'expédition

Le tamis moléculaire de type 4A-DG TRISIV 1/8 est disponible sous forme de granulés de 3,2 mm. Il est expédié sous containers acier, d'un poids net de 135 kg le container.

Propriétés typiques	Granulés 1/8"
Diamètre nominal des pores	4 angströms
Densité "non tassé" (moyenne)	640 kg/cm ³
Densité "tasse"	624 à 657 kg/m ³
Diamètre particule	3,2 mm
Résistance à l'écrasement	6,8 à 7,7 kg
Chaleur d'adsorption (max.)	1.000 kcal/kg H ₂ O
Capacité en eau à l'équilibre*	22% en poids
Teneur en eau (à l'emballage)	1,5% en poids

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

Annexe C : Coefficient de l'équation d'enthalpie H°.

Tableau 2.1 - Coefficients des équations du pouvoir calorifique, de l'enthalpie et de l'entropie des mélanges de gaz parfaits.

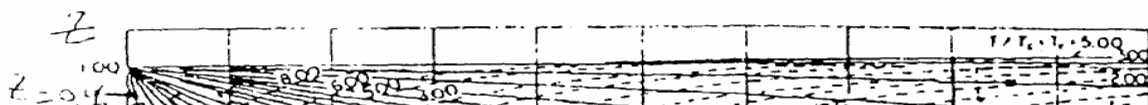
No. CPT	Composant	A	B	C x 10 ³	D x 10 ⁶	E x 10 ⁸	F x 10 ¹⁰	G	Intervalle °C
<i>Non-Hydrocarbures</i>									
1	Oxygène	-2,283574	0,952440	-0,281140	0,655223	-0,452316	1,087744	2,080310	-175 to 1200
2	Hydrogène	28,671997	13,396156	2,960131	-3,980744	2,661667	-6,099863	-11,801371	-175 to 1200
3	Eau	-5,729915	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	-0,373030	-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 1200
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.

Annexe D : Facteur de compressibilité Z



Annexe E : Constantes critiques de pression et de température

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

PHYSICAL CONSTANTS

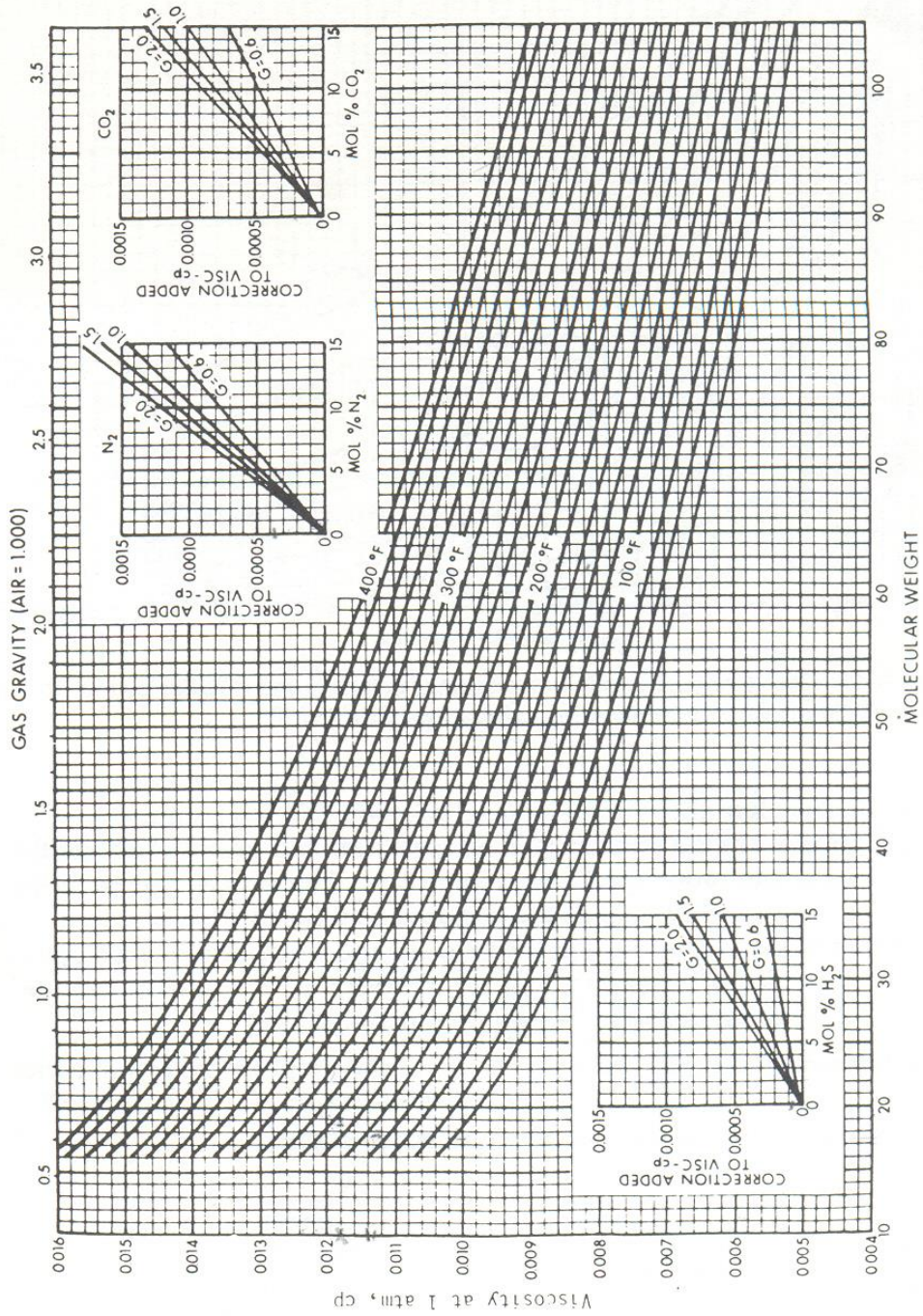
*See the Table of Notes and References.

Number	Compound	Formula	A. Molar mass (molecular weight)	B. Boiling point, °F 14.696 psia	C. Vapor pressure, psia 100 °F	D. Freezing point, °F 14.696 psia	E. Refractive index, n_D 60 °F	Critical constants			Number
								Pressure, psia	Temperature, °F	Volume, ft ³ /lb	
1	Methane	CH ₄	16.043	-258.72	(5000)*	-296.41*	1.00041*	667.0	-116.66	0.0988	1
2	Ethane	C ₂ H ₆	30.070	-127.46	(800)*	-297.02*	1.20971*	707.8	90.07	0.0783	2
3	Propane	C ₃ H ₈	44.097	-43.73	188.68	-305.72*	1.29480*	615.0	205.92	0.0727	3
4	Isobutane	C ₄ H ₁₀	58.123	10.78	72.598	-255.26	1.3245*	527.9	274.41	0.0714	4
5	n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.123	31.08	51.719	-217.03	1.33588*	548.8	305.51	0.0703	5
6	Isopentane	C ₅ H ₁₂	72.150	82.09	20.450	-255.80	1.34771	490.4	368.96	0.0684	6
7	n-Pentane	C ₅ H ₁₂	72.150	96.89	15.580	-201.48	1.35165	488.1	385.7	0.0695	7
8	Neopentane	C ₅ H ₁₂	72.150	49.10	36.72	2.16	1.342*	464.0	321.01	0.0673	8
9	n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.177	155.70	4.9614	-139.56	1.37708	439.5	451.8	0.0688	9
10	2-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.177	140.44	6.769	-244.60	1.36571	436.6	435.76	0.0682	10
11	3-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.177	145.86	6.103	-261.20	1.37090	452.5	448.2	0.0682	11
12	Neohexane	C ₆ H ₁₄	86.177	121.50	9.859	-147.68	1.36283	446.7	419.92	0.0667	12
13	2,3-Dimethylbutane	C ₆ H ₁₄	86.177	136.33	7.406	-199.35	1.36938	454.0	440.08	0.0665	13
14	n-Heptane	C ₇ H ₁₆	100.204	209.07	1.6211	-130.99	1.38234	397.4	510.9	0.0682	14
15	2-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	100.204	194.05	2.273	-180.87	1.37940	396.0	494.44	0.0673	15
16	3-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	100.204	197.33	2.130	—	1.38326	407.6	503.62	0.0646	16
17	3-Ethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	200.26	2.012	-181.44	1.38800	419.2	513.16	0.0665	17
18	2,2-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	174.50	3.494	-190.80	1.37667	401.8	476.98	0.0665	18
19	2,4-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	176.85	3.294	-182.59	1.37591	397.4	475.72	0.0667	19
20	3,3-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	186.87	2.775	-209.99	1.38564	427.9	505.60	0.0662	20
21	Triptane	C ₇ H ₁₆	100.204	177.54	3.376	-12.21	1.38411	427.9	496.24	0.0636	21
22	n-Octane	C ₈ H ₁₈	114.231	258.17	0.5374	-70.17	1.39248	361.1	563.5	0.0673	22
23	Diisobutyl	C ₈ H ₁₈	114.231	228.34	1.102	-132.09	1.38735	361.1	530.26	0.0676	23
24	Isooctane	C ₈ H ₁₈	114.231	210.58	1.709	-161.23	1.38624	372.7	519.28	0.0657	24
25	n-Nonane	C ₉ H ₂₀	128.258	303.40	0.1716	-64.26	1.40054	330.7	610.8	0.0693	25
26	n-Decane	C ₁₀ H ₂₂	142.285	345.40	0.06091	-21.33	1.40720	304.6	652.2	0.0702	26
27	Cyclopentane	C ₅ H ₁₀	70.134	120.60	9.917	-136.89	1.40050	653.8	461.1	0.0594	27
28	Methylcyclopentane	C ₆ H ₁₂	84.161	161.29	4.491	-224.38	1.40400	548.8	499.28	0.0607	28
29	Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	84.161	177.40	3.267	-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

Annexe F : La viscosité μg du gaz à la pression et

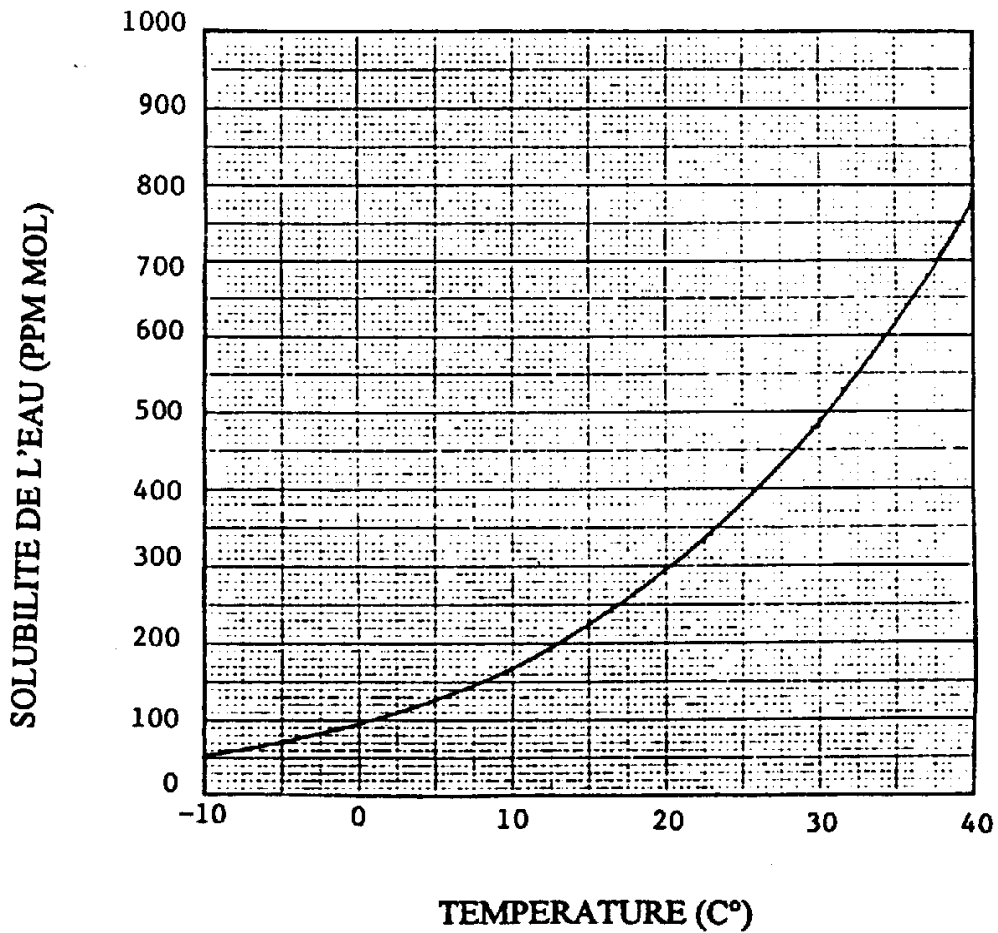
Température d'intérêt.



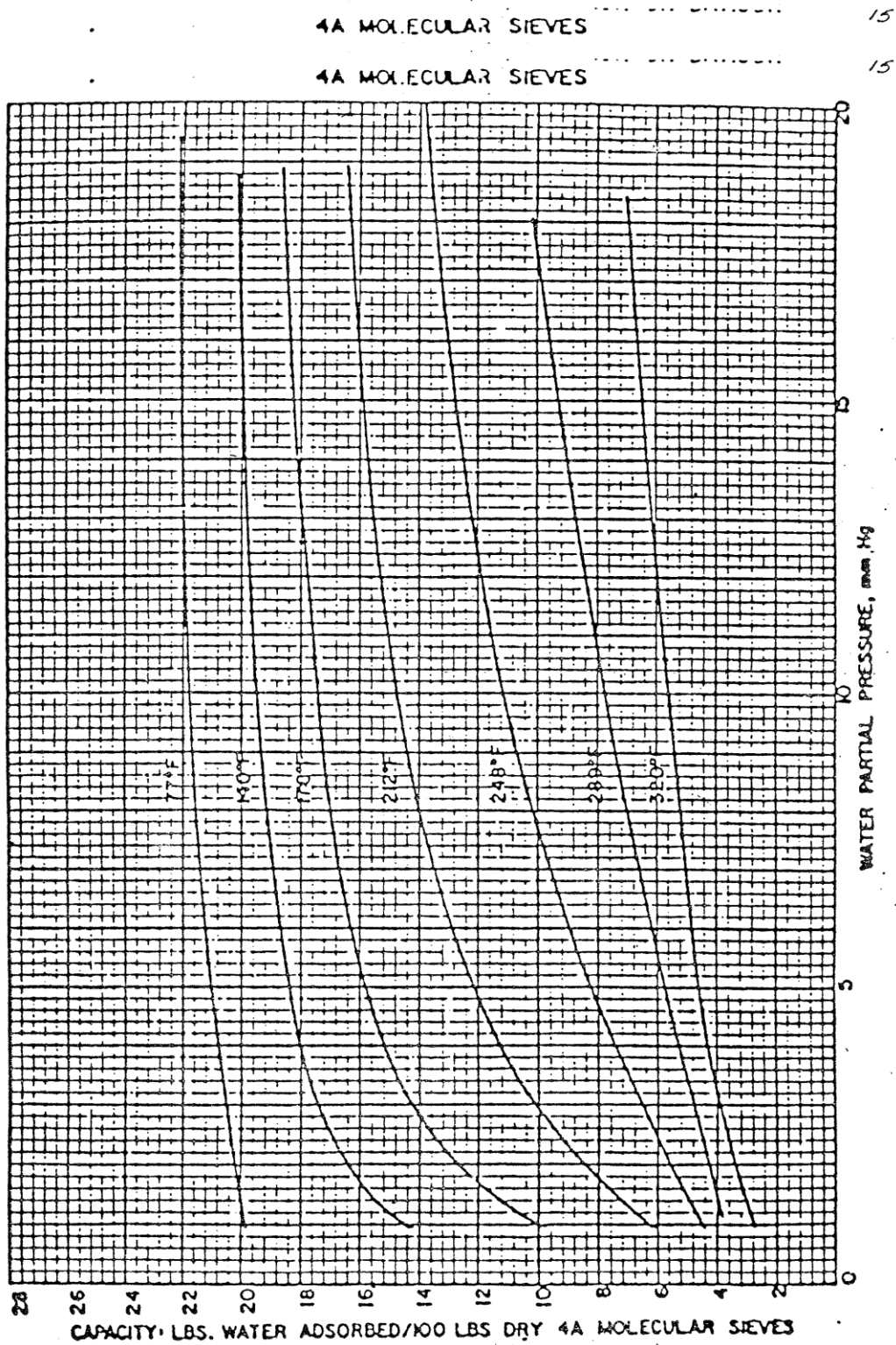
Annexe G :

SOLUBILITE DE L'EAU DANS LA CHARGE DE GPL

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



Annexe H : Capacité d'adsorption de l'eau en fonction de température



Annexe H : Capacité d'adsorption de l'eau en fonction de température

Annexe I : La solubilité de l'eau dans les hydrocarbures liquide.

