

N° Ordre...../Faculté/UMBB/2024



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES

**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**

Département Génie des Procédés Chimiques et Pharmaceutiques

## Mémoire de Master

Présenté par

**HATTAB Bilel**

**HATTAB Ismail**

Filière : Hydrocarbures  
Spécialité : Génie des Procédés  
Option : Pétrochimie

**Thème**

---

*Optimisation du fonctionnement de la section de  
déshydratation de la charge du complexe GP1/Z*

---

**Devant le jury :**

Mr. KADDOUR Omar	Prof	UMBB	Président
Mr. BEDOUD Karim	MAA	UMBB	Examineur
Mme. HAMMADOU Souad	MCA	UMBB	Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024



## *Remerciement*

*Tous d'abord, Nous tenons à remercier Notre Dieu tout puissant de nous avoir donné la patience et le courage pour réaliser ce travail avec succès.*

*Nos grands remerciements à notre encadrant Mme SOUAD HAMMADOU pour sa bienveillance, son suivi et ses suggestions pour l'accomplissement de ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Merci à tous les employés du complexe GP1/Z, les ingénieurs et les opérateurs qui nous ont bien accueilli et bien aide lors de notre stage.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



## *Dédicace*

*Tout c'est grâce à dieu que nous sommes arrivées là.*

*Nous dédions humblement ce travail*

*À nos très chers parents, qui nous ont toujours été présents à nos côtés  
pour nous soutenir et nous conseiller.*

*À nos frères et sœurs, qui ont été nos meilleurs supporters. Votre présence  
a été un réconfort constant.*

*À tous les membres de la famille grande et petite, dont le soutien et les  
encouragements ont été une source de force et de courage.*

*À Mme SOUAD HAMMADOV, notre encadrant, dont les conseils  
avisés, les orientations précieuses et le soutien constant ont été d'une aide  
inestimable dans l'élaboration de ce mémoire.*

*À nos amis, Abed et Abdel Waheb, qui ont partagé nos joies, nos peines  
et nos succès. Votre amitié est un trésor que nous chérirons toujours.*

*À tous Ceux qui nous connaissent de près ou de loin sans cité leurs noms,  
sans oublier nos enseignants et nos camarades de la promotion de 2eme  
master pétrochimie.*

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

## Résumé

En vue de la préparation de notre mémoire, on nous a assigné le thème de l'étude sur l'influence de la diminution de la teneur en eau du GPL sur les paramètres opérationnels de la section de déshydratation de charge.

Dans le but d'optimiser l'efficacité énergétique de l'unité de déshydratation, nous avons réalisé un calcul des diverses quantités de chaleur sur l'ensemble de la section de déshydratation suite à une étude détaillée du bilan massique de la colonne d'adsorption, Cela a été initié par la présentation des données du problème et de la méthodologie employée pour réaliser nos calculs.

Pour confirmer la validité de la méthode de calcul, un travail de vérification a également été réalisé.

Nous envisageons de suggérer, à la fin de notre étude, un programme de calcul permettant de déterminer les paramètres optimaux de fonctionnement du déshydrateur de charge afin de résoudre cette problématique.

## Abstract

In view of the preparation of our dissertation, we were assigned the theme of the study on the influence of the reduction in the water content of LPG on the operational parameters of the feed dehydration section.

In order to optimize the energy efficiency of the dehydration unit, we have carried out a calculation of the various quantities of heat over the entire dehydration section following a detailed study of the mass balance of the adsorption column, this was initiated by the presentation of the data of the problem and the methodology used to carry out our calculations.

To confirm the validity of the calculation method, verification work was also carried out.

We plan to suggest, at the end of our study, a calculation program to determine the optimal operating parameters of the load dehydrator in order to resolve this problem.

## ملخص

من أجل إعداد أطروحتنا، تم تخصيص موضوع دراسة لنا حول تأثير تقليل محتوى الماء لغاز البترول المسال على المعلمات التشغيلية لقسم تجفيف الحمل. بهدف تحسين الكفاءة الطاقوية لوحدة التجفيف، أجرينا حساباً لمختلف كميات الحرارة على قسم التجفيف بأكمله بعد دراسة تفصيلية للتوازن الكتلي لعمود الامتزاز، وقد بدأ ذلك من خلال تقديم بيانات المشكلة والمنهجية المستخدمة لإجراء حساباتنا.

للتأكد من صحة طريقة الحساب، تم أيضاً إجراء أعمال التحقق. نحن نخطط لاقتراح، في نهاية دراستنا، برنامج حسابي يسمح بتحديد معلمات التشغيل المثلى لمجفف الحمل من أجل

حل هذه المشكلة.

# SOMMAIRE

## Liste des abréviations

## Liste des figures

## Liste des tableaux

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

### CHAPITRE I : PRESENTATION DU COMPLEXE DU GP1/Z

I.1	Introduction .....	3
I.2	Présentation du complexe GP1/Z.....	3
I.2.1	Historique.....	3
I.2.2	Situation .....	4
I.2.3	Organisation du complexe .....	4
I.2.4	Différentes caractéristiques du complexe GP1/Z .....	6
I.3	Installations du complexe GP1/Z.....	7
I.3.1	Installations de pré-traitement du GPL.....	7
I.3.2	Installations de stockage d'alimentation.....	7
I.3.3	Installations de production.....	8
I.3.3.1	Section de déshydratation de la charge.....	9
I.3.3.2	Section de séparation du GPL.....	10
I.3.3.3	Section déshydratation de garde .....	14
I.3.3.4	Section de Réfrigération .....	14
I.3.3.5	Section d'huile chaude.....	15
I.3.4	Installations d'utilité .....	16
I.3.5	Installations de stockage des produits finis.....	17
I.3.6	Installations de chargements .....	19
I.4	Généralité sur le GPL.....	21
I.4.1	Historique.....	21
I.4.2	Définition du GPL.....	21
I.4.3	Procédés d'obtentions du GPL.....	21
I.4.4	Propriétés du GPL.....	22
I.4.5	Domaine d'utilisation du GPL .....	24
I.4.6	Caractéristiques du propane et du butane commercial .....	25
I.4.7	Risques du GPL .....	26

## **CHAPITRE II : SECTION DE DESHYDRATATION DE LA CHARGE**

II.1	Introduction .....	27
II.2	Description générale.....	27
II.2.1	Equipements Statiques (Train-100) .....	27
II.2.2	Vanneries déshydrateur de charge (Train 100).....	28
II.3	Description interne du déshydrateur .....	28
II.4	Circuit de GPL .....	29
II.5	Cycle de régénération.....	30
II.5.1	Drainage .....	30
II.5.2	Dépressurisation.....	31
II.5.3	Chauffage .....	32
II.5.4	Refroidissement .....	33
II.5.5	Remise sous pression .....	34
II.5.6	Remplissage en liquide .....	34

## **CHAPITRE III : MODES DE DESHYDRATATION ET TAMIS MOLECULAIRES**

III.1	Introduction .....	37
III.2	LES HYDRATES .....	37
III.2.1	Définition des hydrates .....	37
III.2.2	Types des hydrates .....	38
III.2.3	Conditions de formation des hydrates.....	38
III.2.4	Prévention des hydrates .....	39
III.3	LES MODES DE DESHYDRATATION.....	40
III.3.1	Déshydratation du GPL par refroidissement.....	41
III.3.1.1	Injection de glycol.....	41
III.3.1.2	Injection de méthanol.....	41
III.3.2	Déshydratation par absorption (avec un solvant physique).....	41
III.3.3	Déshydratation par adsorption (sur un desséchant solide).....	41
III.4	PHENOMENE D'ADSORPTION.....	42
III.4.1	Définition de l'adsorption .....	42
III.4.2	Description du phénomène d'adsorption .....	42
III.4.3	Types d'adsorption.....	43
III.4.4	Mécanisme l'adsorption.....	44
III.4.5	Facteurs influençant l'adsorption.....	45
III.4.6	Avantages et inconvénients de la déshydratation par adsorption .....	45

III.4.7	Zone de transfert de masse (ZMT).....	45
III.4.8	Concept de la zone de transfert de masse .....	46
III.4.9	Principaux adsorbants .....	48
III.4.10	Caractéristiques des adsorbants .....	50
III.5	TAMIS MOLECULAIRES .....	51
III.5.1	Définition du tamis moléculaire.....	51
III.5.2	Description des tamis moléculaires .....	51
III.5.3	Formule du tamis moléculaire .....	52
III.5.4	Types des tamis moléculaires .....	53
III.5.5	Principes d'adsorption des tamis moléculaires .....	55
III.5.6	Composition chimique de tamis moléculaire.....	55
III.5.8	Avantages des tamis moléculaires .....	56
III.6	EFFET DES VARIABLES DE CONCEPTION DU LIT .....	57
III.6.1	Vitesse et diamètre du lit.....	57
III.6.2	Teneur en adsorbat de l'effluent .....	57
III.6.3	Charge d'adsorbat .....	57
III.6.4	Phase liquide ou gazeuse .....	58
III.6.5	Dimensions des particules.....	58
III.7	EFFET DES VARIABLES DE PROCEDE .....	58
III.7.1	Température .....	58
III.7.2	Pression .....	58
III.7.3	Concentration.....	58
III.7.4	Direction de l'écoulement.....	59
III.7.5	Type et dimension du tamis .....	59
III.8	REGENERATION DES TAMIS MOLECULAIRES .....	59
III.8.1	Désorption par augmentation de la température .....	60
III.8.2	Désorption par diminution de la pression partielle .....	60
III.8.3	Désorption par déplacement par un composé adsorbable.....	60

#### CHAPITRE IV : PRESENTATION DU PROBLEME ET LA METHODE DE CALCUL

IV.1	Problématique .....	61
IV.2	Méthode de calcul .....	64
IV.3	Constitution d'un déshydrateur de charge.....	65
IV.4	Théorie de calcul .....	66
IV.4.1	Bilan énergétique .....	66

IV.4.2	Bilan de matière de la régénération .....	69
--------	---	----

## CHAPITRE V : VALIDITE DE LA METHODE

V.1	Introduction .....	71
V.2	Calcul du poids moléculaire du GPL .....	71
V.3	Dimensionnement d'un déshydrateur .....	72
V.3.1	Calcul de la quantité d'eau adsorbée .....	72
V.3.2	Calcul du temps d'adsorption .....	76
V.3.3	Détermination de l'efficacité d'adsorption .....	76
V.4	Calcul du bilan thermique .....	77
V.4.1	Propriété du gaz de régénération.....	77
V.4.2	Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis $Q_{\text{tamis}}$ .....	78
V.4.3	Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage de l'acier.....	79
V.4.4	Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption $Q_{\text{des}}$ .....	81
V.4.5	Calcul des pertes de chaleur $Q_{\text{perte}}$ .....	81
V.4.6	Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération $Q_{\text{totale}}$ .....	81
V.4.7	Calcul de la chaleur fournie par le four lors du réchauffage $H_f$ .....	82
V.4.8	Calcul du temps de réchauffage du tamis $t_r$ .....	82
V.4.9	Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle $H_{f/\text{cycle}}$ .....	83
V.4.10	Calcul du temps de refroidissement du tamis $t_{\text{ref}}$ .....	84
V.4.11	Calcul de la chaleur soutirée au système $Q_{\text{ref}}$ .....	84
V.5	Calcul du bilan de matière de la régénération.....	84
V.5.1	Calcul du débit du gaz de refroidissement.....	84
V.5.2	Calcul des pertes de charge.....	85
V.6	Résumé des résultats obtenus.....	89
V.7	Interprétation des résultats .....	90

## CHAPITRE VI : ETUDE DES SOLUTIONS

VI.1	Etude de la première solution.....	91
VI.1.1	Calcul le temps d'adsorption .....	91
VI.1.2	Détermination de l'efficacité d'adsorption .....	93
VI.1.3	Calcul du bilan thermique .....	93
VI.1.4	Calcul du bilan de matière de la régénération.....	96
VI.1.5	Interprétation des résultats .....	99
VI.2	Etude de la deuxième solution .....	100
VI.2.1	Calcul de la quantité d'eau adsorbée .....	100



VI.2.2	Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 kg de dessicant (X)..	101
VI.2.3	Détermination de l'efficacité d'adsorption .....	101
VI.2.4	Calcul du bilan thermique .....	101
VI.2.5	Calcul du bilan de matière de la régénération.....	104
VI.2.6	Interprétation des résultats .....	105
VI.3	Comparaison entre les deux solutions optimales .....	106
VI.3.1	Première solution .....	106
VI.3.2	Deuxième solution .....	108
VI.5	Interprétation et choix de la solution optimale.....	112

## **CHAPITRE VII : ETUDE ECONOMIQUE**

VII.1	Introduction .....	113
VII.2	Etude économique des résultats de la solution optimale.....	113
VII.2.1	Gain en gaz naturel .....	113
VII.2.2	Gain en vie du tamis moléculaire.....	114
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>117</b>

### **Références bibliographiques**

### **Annexes**

## LISTE DES ABREVIATIONS

- GP1/Z :** Complexe de gaz pétrolier liquéfié.
- RTO :** Transport par canalisation à l'Ouest.
- GPL :** Gaz pétrolier liquéfié.
- GN:** Gaz naturel.
- B.O.G:** Boil Off Gas.
- PDI :** Indicateur de Pression Différentiel.
- HP :** Haute pression.
- MP :** Moyenne Pression.
- BP :** Basse Pression.
- ELLIOS :** Unité de liquéfaction d'hélium.
- COGIZ :** Usine de production de l'azote.
- SWV :** Switch valve.
- Lb :** Unité de masse (Pound).
- ZMT :** Zone de transfert de masse.
- Psia:** Pound force square inch.

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I-1</b> : Localisation du complexe GP1/Z sur la zone industrielle d'Arzew. ....	4
<b>Figure I-2</b> : Organigramme du complexe GP1/Z.....	5
<b>Figure I-3</b> : Plan de masse du complexe.....	6
<b>Figure I-4</b> : Schéma représentatif de la Section de stockage de la charge GPL.....	8
<b>Figure I-5</b> : Section de production.....	8
<b>Figure I-6</b> : Schéma du procédé de liquéfaction du GPL.....	9
<b>Figure I-7</b> : Schéma représentatif de la Section déshydratation de charge.....	10
<b>Figure I-8</b> : Schéma représentatif du Fractionnateur.....	11
<b>Figure I-9</b> : Schéma représentatif du Dééthaniseur.....	12
<b>Figure I-10</b> : Schéma représentatif du Dépentaniseur.....	13
<b>Figure I-11</b> : Schéma représentatif de la Section déshydratation de garde.....	14
<b>Figure I-12</b> : Schéma représentatif de la Section Réfrigération.....	15
<b>Figure I-13</b> : Schéma représentatif de la Section d'huile chaude.....	16
<b>Figure I-14</b> : Schéma représentatif de la Section de stockage à basse température.....	17
<b>Figure I-15</b> : Schéma représentatif de la Section de stockage à température ambiante.....	18
<b>Figure I-17</b> : Bacs de stockage.....	18
<b>Figure I-16</b> : Sphères de stockage.....	18
<b>Figure I-18</b> : Quai de chargement de navire du GP1/Z.....	19
<b>Figure I-19</b> : Rampe de chargement de camion du GP1/Z.....	19
<b>Figure I-20</b> : Schéma principale de procédé du (GPL).....	20
<b>Figure I-21</b> : Récupération des GPL à partir du pétrole brut.....	22
<b>Figure I-22</b> : Récupération du GPL à partir des champs de GN.....	22
<b>Figure I-23</b> : Structure chimique du butane et propane.....	26
<b>Figure II-1</b> : Schéma de déshydrateur.....	29
<b>Figure II-2</b> : Séquence de drainage.....	31
<b>Figure II-3</b> : Séquence de dépressurisation.....	31
<b>Figure II-4</b> : Séquence de chauffage.....	32
<b>Figure II-5</b> : Séquence de refroidissement.....	33
<b>Figure II-6</b> : Séquence de pressurisation.....	34
<b>Figure II-7</b> : Séquence de remplissage.....	35
<b>Figure II-8</b> : Colonnes de déshydratation.....	35
<b>Figure II-9</b> : Schéma de la section de déshydratation.....	36

<b>Figure III-1</b> : Structures des hydrates.....	38
<b>Figure III-2</b> : Accumulation des hydrates dans une conduite. ....	40
<b>Figure III-3</b> : Processus d'adsorption.....	42
<b>Figure III-4</b> : Diverses étapes du processus de transfert d'un soluté pendant son adsorption sur un matériau microporeux. ....	44
<b>Figure III-5</b> : Emplacement de la zone ZMT. ....	46
<b>Figure III-6</b> : Evolution de la concentration de l'adsorbat (fluide) au cours de l'adsorption. ....	47
<b>Figure III-7</b> : Adsorption idéale en colonne (ZTM).....	48
<b>Figure III-8</b> : Différentes formes de tamis moléculaires.....	51
<b>Figure III-9</b> : Tamis moléculaire 3A et 4A. ....	52
<b>Figure III-10</b> : Structure de Zéolithes.....	53
<b>Figure III-11</b> : Tamis moléculaires utilisés au niveau du complexe GP1/Z.....	56
<b>Figure IV-1</b> : la variation de la teneur en eau dans la charge durant 24 heures (Le 1er février 2024). ....	61
<b>Figure IV-2</b> : la variation de la teneur en eau dans la charge durant une semaine.....	62
<b>Figure IV-3</b> : la variation de la teneur en eau dans la charge durant un mois. ....	62
<b>Figure IV-4</b> : la variation de la teneur en eau dans la charge durant un mois.....	63
<b>Figure IV-5</b> : la variation de la teneur en eau dans la charge durant un mois. ....	63
<b>Figure VI-1</b> : Le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau.....	107
<b>Figure VI-2</b> : Le nombre de régénération par an en fonction de la teneur en eau.....	107
<b>Figure VI-3</b> : Le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau.....	109
<b>Figure VI-4</b> : Quantité de GN utilisée lors d'une régénération en fonction de la teneur en eau. ....	109
<b>Figure VI-5</b> : Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an en fonction de la teneur en eau. ....	110
<b>Figure VI-6</b> : Gain en quantité de GN pendant un an par train en fonction de la teneur en eau. ....	111

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I-1</b> : Caractéristiques physico-chimiques du butane et du propane.....	23
<b>Tableau I-2</b> : Caractéristiques du propane et du butane commercial du GP1/Z.....	25
<b>Tableau II-1</b> : Cycle de régénération. ....	30
<b>Tableau III-1</b> : Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique .....	43
<b>Tableau III-2</b> : Les principales caractéristiques physiques des adsorbants.....	50
<b>Tableau III-3</b> : Caractéristique générale des tamis moléculaire.....	54
<b>Tableau III-4</b> : Composition chimique du tamis UOP UI 94.....	55
<b>Tableau III-5</b> : Vitesse et diamètre du lit. ....	57
<b>Tableau IV-1</b> : Fiche technique du déshydrateur. ....	65
<b>Tableau V-1</b> : Composition de la charge du GPL. ....	71
<b>Tableau V-2</b> : Composition du gaz de régénération. ....	77
<b>Tableau V-3</b> : Les données de réchauffage du tamis.....	82
<b>Tableau V-4</b> : Représentation des valeurs de design et des valeurs calculées. ....	89
<b>Tableau VI-1</b> : La variation du temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau pour un temps de régénération fixé. ....	106
<b>Tableau VI-2</b> : La variation du temps de régénération en fonction de la teneur en eau pour un temps d'adsorption fixé.....	108
<b>Tableau VII-1</b> : Gain annuel en GN et en vie des tamis pour le cycle calculé. ....	116

## *Introduction générale*

L'évolution de la civilisation est principalement liée à l'exploitation de l'énergie par l'être humain. En utilisant des méthodes de plus en plus avancées, l'humanité a progressivement exploré et exploité les réserves d'énergie stockées par la nature, telles que les gisements de charbon, de pétrole et de gaz.

Assurément, le pétrole et le gaz sont parmi les ressources naturelles les plus cruciales pour notre nation.

Le GPL, ou gaz de pétrole liquéfié, est aujourd'hui un défi majeur sur le marché mondial des combustibles, à côté du kérosène et du naphta.

Dans le passé, l'énergie était peu coûteuse, ce qui signifie que l'industrie n'accordait pas beaucoup d'attention à ce sujet d'une manière générale. Cependant, ces dernières années, avec le coût croissant de l'énergie influant de plus en plus sur les finances des entreprises, celles-ci ont commencé à se concentrer davantage sur cette question. Elles sont naturellement devenues plus intéressées par cet aspect crucial qui influe considérablement sur le coût du produit final.

Il est devenu de plus en plus clair dans les unités industrielles que la fonction principale à optimiser ne se limite pas au profit à court terme ou à l'augmentation de la production, mais à s'assurer que les équipements fonctionnent efficacement pour une productivité maximale.

Pour l'entreprise en ce moment, la consommation d'énergie revêt une importance équivalente à celle accordée à la sécurité, la pollution et le contrôle de qualité.

L'optimisation de la consommation d'énergie demeure une priorité majeure pour les exploitants du complexe GP1/Z.

Notre but est d'optimiser le fonctionnement de la section de déshydratation de la charge en raison de la surconsommation d'énergie observée à ce niveau.

Il est nécessaire de rechercher les origines de ce problème, étudier les raisons et explorer des solutions, sans perturber le bon fonctionnement du complexe d'une part et en évitant tout investissement supplémentaire d'autre part.

Afin d'atteindre cet objectif, notre mémoire se divise en deux grandes parties : la théorique et la pratique.

Dans la partie théorique :

- Premier point abordé est la description du complexe GP1/Z.
- Nous passons ensuite à l'étude détaillée de la section de déshydratation de la charge.
- Enfin, nous expliquons les différents modes de déshydratation et les tamis moléculaires.

Dans la partie pratique :

- Nous examinons les données pour identifier le problème de la surconsommation d'énergie à travers le calcul des différentes quantités de chaleur dans l'ensemble de la section.
- En outre, nous étudions le bilan massique de cette colonne d'adsorption, en débutant par exposer les données du problème et la méthodologie utilisée pour effectuer nos calculs.
- Pour vérifier la validité de la méthode de calcul, nous commençons par effectuer les calculs pour un sécheur en fonction du design, puis à confirmer les résultats obtenus par rapport à la réalité.
- Enfin, nous proposons un programme de calcul pour identifier les paramètres de fonctionnement optimaux d'un déshydrateur de charge.

Notre mémoire se termine par une conclusion générale, des références bibliographiques et une liste des annexes.



# **CHAPITRE I**

## **PRESENTATION DU COMPLEXE**

**GP1/Z**



## I.1 Introduction

Le pétrole et le gaz sont les ressources naturelles les plus importants en Algérie, constituant la base de son économie grâce à l'industrie des hydrocarbures. La société leader dans ce domaine en Algérie et en Afrique est la SONATRACH, c'est une entreprise nationale spécialisée dans la recherche, la production, le transport, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures. Parmi ses nombreux complexes de séparation, Le complexe GP1/Z dénommé (jumbo GPL) pour ses grandes capacités et le dernier-né des ensembles industriels de la zone d'ARZEW. Et se distingue comme un centre majeur de séparation de gaz de pétrole liquéfié, principalement composé de butane et de propane.

Actuellement, La demande croissante en gaz de pétrole liquéfié (GPL) est notable. Cette ressource énergétique revêt une importance particulière en raison de son bas taux de pollution par rapport aux combustibles classiques. Sa capacité à être facilement condensé, stocké et utilisé en fait une source d'énergie idéale pour de nombreuses applications variées.

## I.2 Présentation du complexe GP1/Z

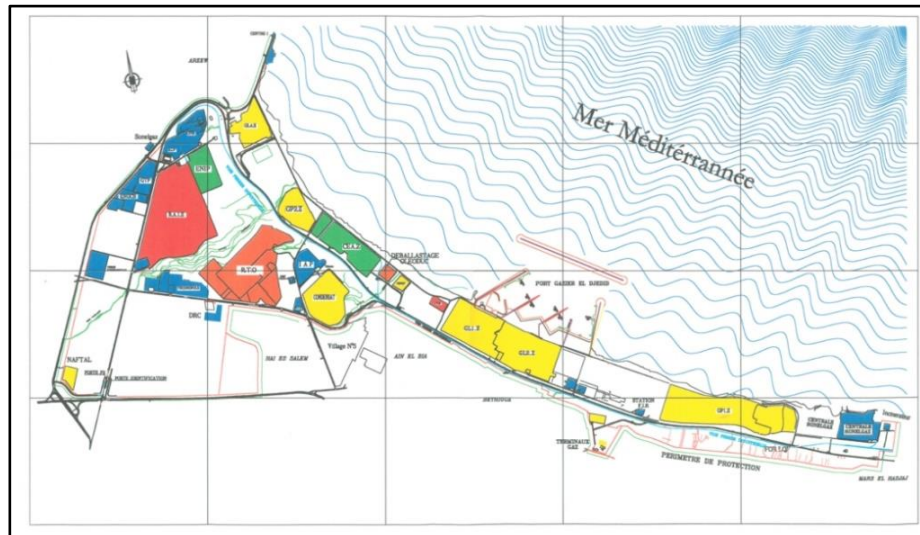
### I.2.1 Historique

Le complexe GP1/Z fait partie des six complexes de liquéfaction relevant de l'activité (AVAL) de la société nationale SONATRACH. Il a été construit avec le concours d'un consortium Japonais IHI -ITOCHU, dans le cadre d'un contrat clé en main comprenant trois phases de construction successives. La première phase a été achevée le 2 septembre 1984, la deuxième le 20 novembre 1998, et enfin la troisième le 24 février 2010.

En 1983, le complexe disposait de quatre trains de traitement GPL, permettant une production de 4,8 millions de tonnes par an. Suite à l'acquisition de deux trains supplémentaires (extension du complexe en 1998), la capacité de production a été augmentée pour atteindre 7,2 millions de tonnes par an. Avec la mise en service de la troisième phase, la production est estimée à 10,8 millions de tonnes par an. Le complexe vise le traitement d'une charge GPL brut en provenance des champs du Sud Algérien afin de produire du Propane et du Butane destinés aux marchés national et international, il est connu sous le nom de JUMBO-GPL en raison de ses importantes capacités de production. [1]

## I.2.2 Situation [1]

Le complexe GP1/Z est situé dans la zone industrielle d'ARZEW, entre la centrale thermoélectrique de MERS EL HADJAJ à l'Est et les complexes de GNL/Z à l'Ouest, entre la mer méditerranée et la route nationale N°1.1, et qui s'étend sur une superficie de 120 hectares.



*Figure I-1 : Localisation du complexe GP1/Z sur la zone industrielle d'Arzew.*

## I.2.3 Organisation du complexe

La présentation des structures nous renseigne sur la situation géographique, l'effectif, les objectifs et les fonctions de chaque département, permettant ainsi une compréhension complète du fonctionnement du complexe GP1/Z. Ce dernier est administré selon un organigramme précis afin d'assurer une gestion efficace des tâches. Il comprend une direction générale, deux sous-directions et des départements de contrôle, comme illustré dans l'organigramme suivant (Figure I-2). [1]

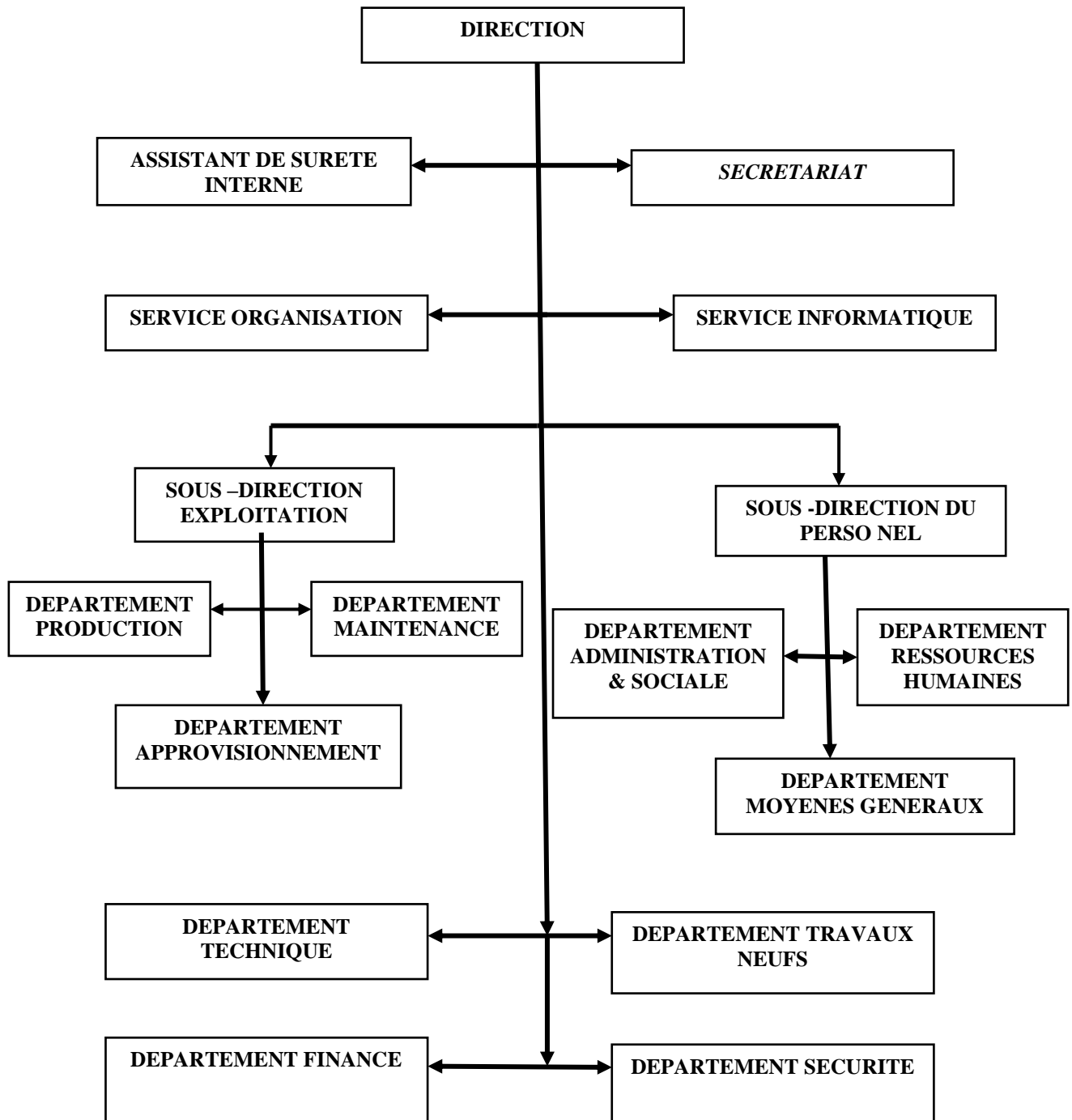


Figure I-2 : Organigramme du complexe GP1/Z.

### I.2.4 Différentes caractéristiques du complexe GP1/Z [1]

- Capacité de production : 10,8 millions de tonnes par an.

Les principales installations du complexe GP1/Z sont :

- 22 sphères de stockage de la charge d'alimentation de 1000 m<sup>3</sup> chacune.
- 9 trains de traitement du GPL.
- 2 unités de reliquéfaction des boil-off.
- 1 station électrique alimentée par SONALGAZ.
- 4 générateurs de secours pour assurer l'électricité en cas de coupure de courant.
- 4 bacs de stockage de propane à basse température.
- 4 bacs de stockage de butane à basse température.
- 4 sphères de stockage de produit ambiant (propane, butane).
- 1 sphère de stockage de pentane.
- 5 salles de contrôle.
- Une station de pomperie eau de mer pour le réseau eau incendie.
- 2 quais de chargement (jetées D1 et M6). 1 rampe pour chargement camions.
- Système de télésurveillance.
- Bâtiment administratif.
- Laboratoire d'analyses et de contrôle.
- Atelier de maintenance.
- Magasin approvisionnement.

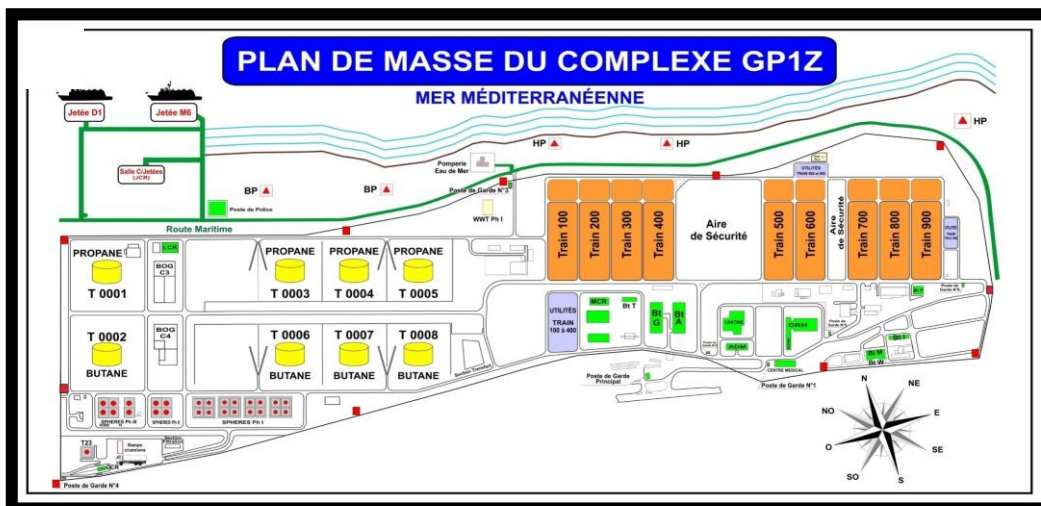


Figure I-3 : Plan de masse du complexe.

### I.3 Installations du complexe GP1/Z [2]

Le complexe GP1Z est composé de diverses installations qui se présentent de la manière suivante :

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

#### I.3.1 Installations de pré-traitement du GPL

La charge d'alimentation en GPL brut est assurée par **RTO (Région Transport Ouest)** au complexe GP1/Z à partir de divers champs du sud tels que Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Adrar, In Amenas, Tin-Fouye Tabankort et Rhourde Nouss. [3]

Avant d'être stocké dans les sphères de charge, le GPL subit les étapes suivantes :

- **Filtration** : pour éliminer les sables (impuretés et poudres noirs).
- **Démercuration** : Une nouvelle unité a été installée en 2010 pour réduire ou éliminer le mercure du GPL en raison des exigences du marché.
- **Equaliseur** : Pour enlever l'eau libre visible à l'œil nu, le GPL passe par un Equaliseur.
- **Ballon dégazeur** : Le GPL traverse ce ballon pour éliminer les gaz évaporés. [2]

Après ces étapes on remplit le GPL dans les sphères de charge.

#### I.3.2 Installations de stockage d'alimentation

Cette section a pour objectif de garantir un fonctionnement stable et une autonomie de plus de 10 heures afin d'alimenter les trains en GPL brut en cas d'interruption du pompage. De plus, elle est conçue pour recevoir le flux de recyclage ou le produit hors spécifications provenant des sections en aval.

Le GPL est transporté vers des installations comprennent 22 sphères qui stockent temporairement la charge, avec une capacité totale de 22 000 m<sup>3</sup> et de 1000 m<sup>3</sup> chacune. [3]

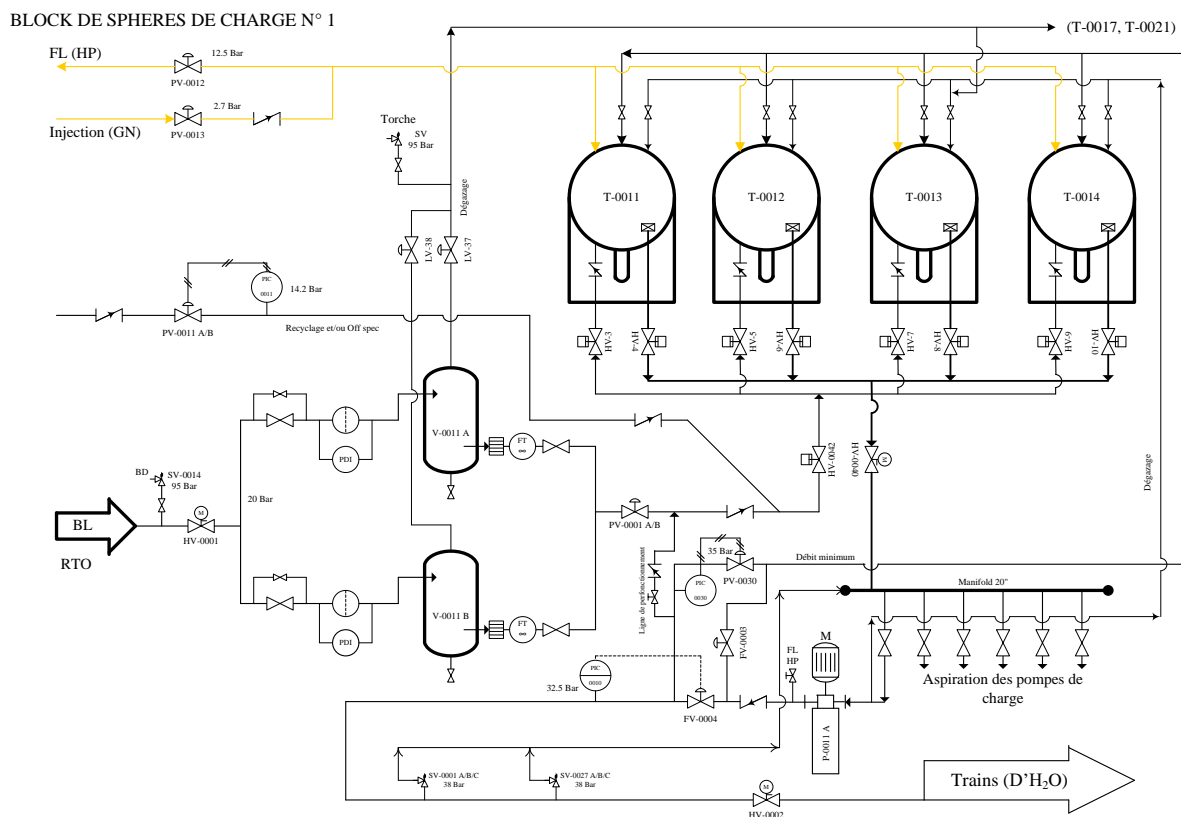


Figure I-4 : Schéma représentatif de la Section de stockage de la charge GPL.

### I.3.3 Installations de production

Le complexe GP1/Z comprend 09 trains opérant dans la zone de procédé. Chaque train a été conçu pour produire annuellement un million de tonnes de produits (propane et butane commercial). [2]

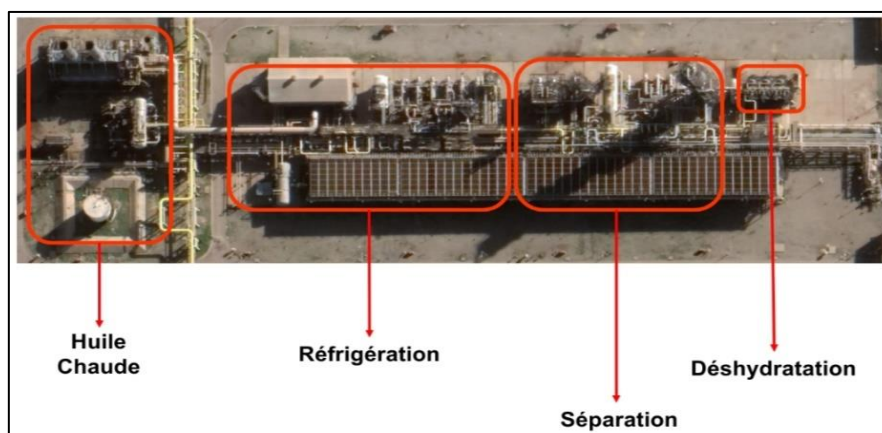
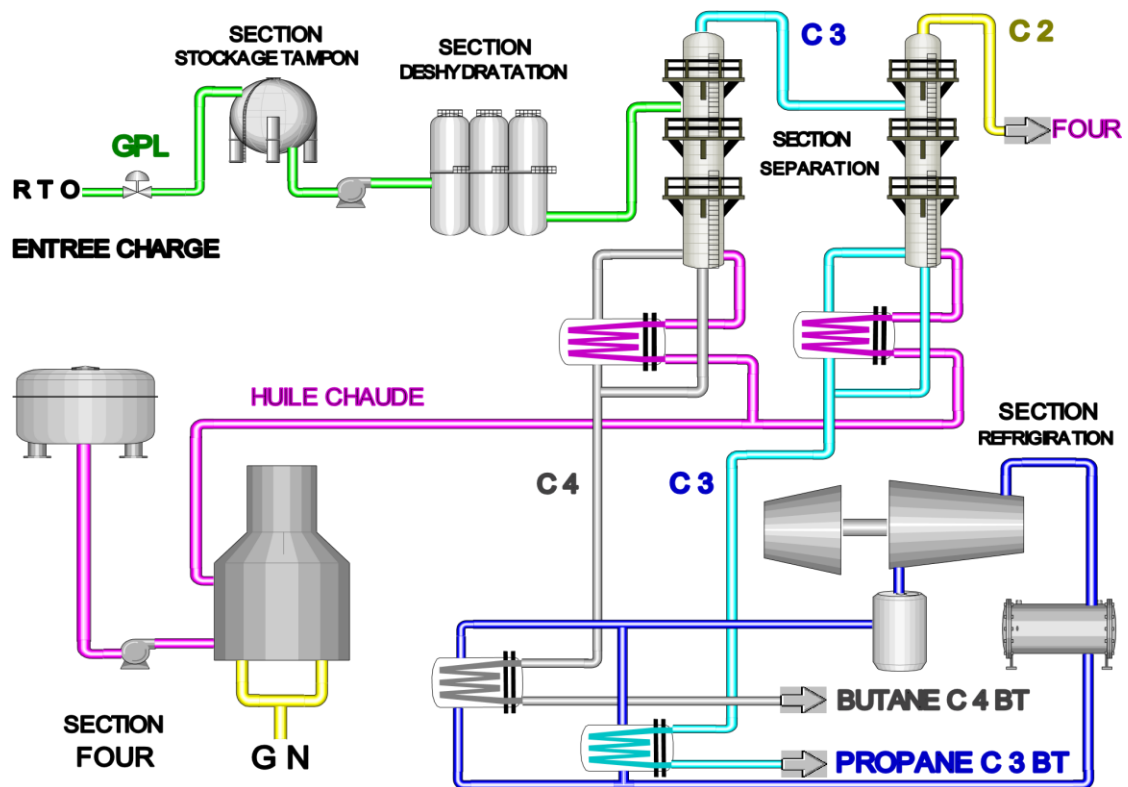


Figure I-5 : Section de production.



*Figure I-6 : Schéma du procédé de liquéfaction du GPL.*

### I.3.3.1 Section de déshydratation de la charge

La section de déshydratation permet de réduire la teneur en eau dissoute dans le GPL de 100 ppm à 5 ppm en poids en utilisant des tamis moléculaires qui adsorbent les molécules d'eau afin de prévenir la formation de glace et de bouchons de givre dans les parties froides de l'installation (réfrigération). [4]

- L'étude de la section de déshydratation sera examinée en détail dans le chapitre suivant en raison de son étroite relation avec le sujet traité.

SECTION DEHYDRATATION DE CHARGE

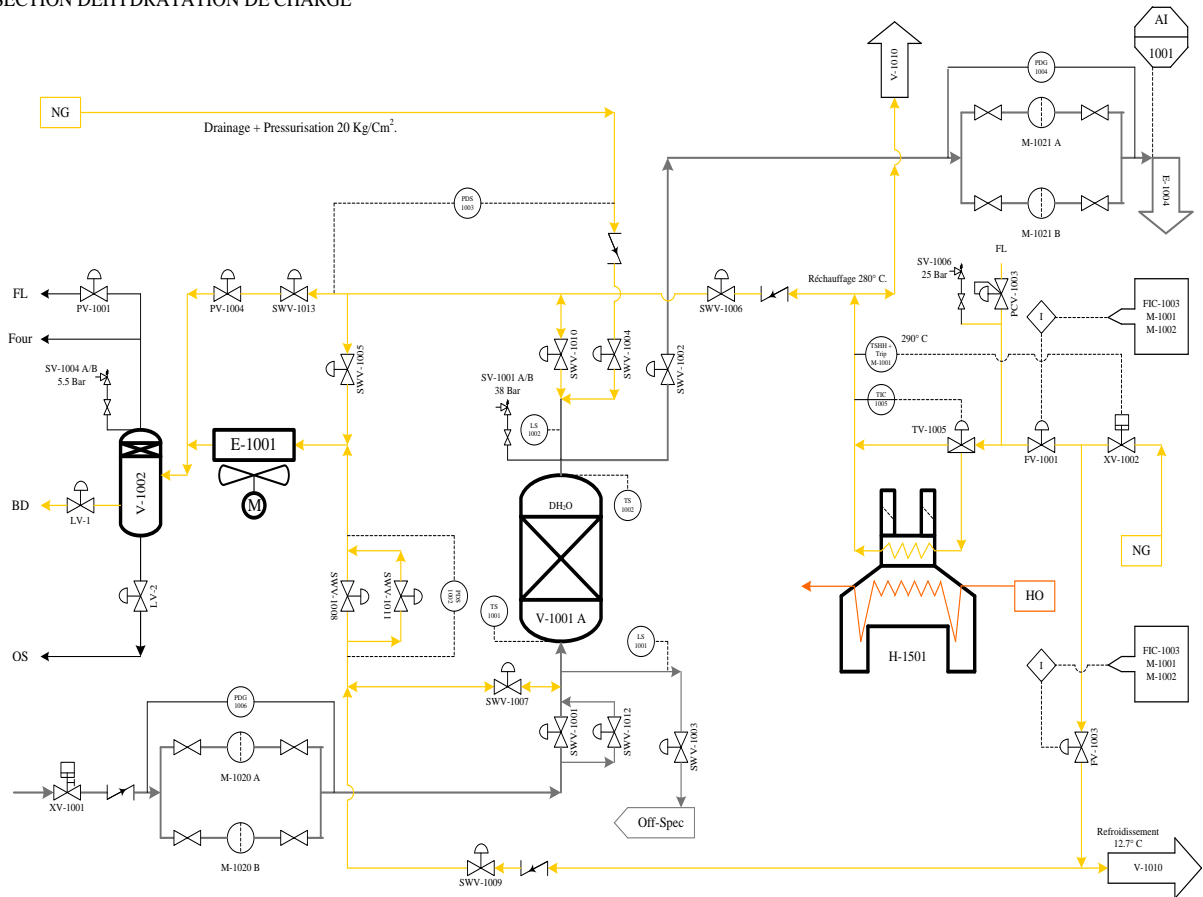


Figure I-7 : Schéma représentatif de la Section déshydratation de charge.

I.3.3.2 Section de séparation du GPL

C'est la section chargée de séparer le GPL en deux produits finis : le propane et le butane, ainsi que de petites quantités d'éthane et de pentane. Avant d'entrer dans le splitter, le GPL doit être déshydraté et chauffé à sa température d'ébullition de 71°C à travers trois préchauffeurs. Le premier est chauffé par le produit de fond du dééthaniseur, le second par les produits de fond de la colonne de distillation et le dernier par l'huile chaude provenant du four. Le GPL ainsi préchauffé à 71°C est ensuite introduit directement dans le splitter (plateaux à clapets) où il est séparé en propane et éthane en tête de colonne, et en butane et pentane au fond de la colonne. Les produits de la tête de colonne sont condensés et récupérés au niveau du ballon de reflux. Le pentane récupéré du fond du dépentaniseur est refroidi par un aéro-réfrigérant avant d'être dirigé vers le stockage ambiant. [5]



Les équipements de la section de séparation sont :

- **Fractionnateur**

Après avoir été déshydraté, le GPL brut est acheminé vers la section de séparation (Figure I-8) pour alimenter le fractionnateur V-N101. Dans le fractionnateur, le GPL brut subit un processus de séparation pour produire du butane en bas de la colonne et du propane liquide en haut. La colonne est composée de 55 plateaux à clapets. Le fonctionnement du fractionnateur est réglé de manière à obtenir la séparation désirée entre le propane et le butane, tout en assurant un taux de récupération recherché. La température d'entrée du fractionnateur est de 71°C. La pression à l'intérieur de la colonne est en moyenne de 20 Kg/cm<sup>2</sup>. [4]

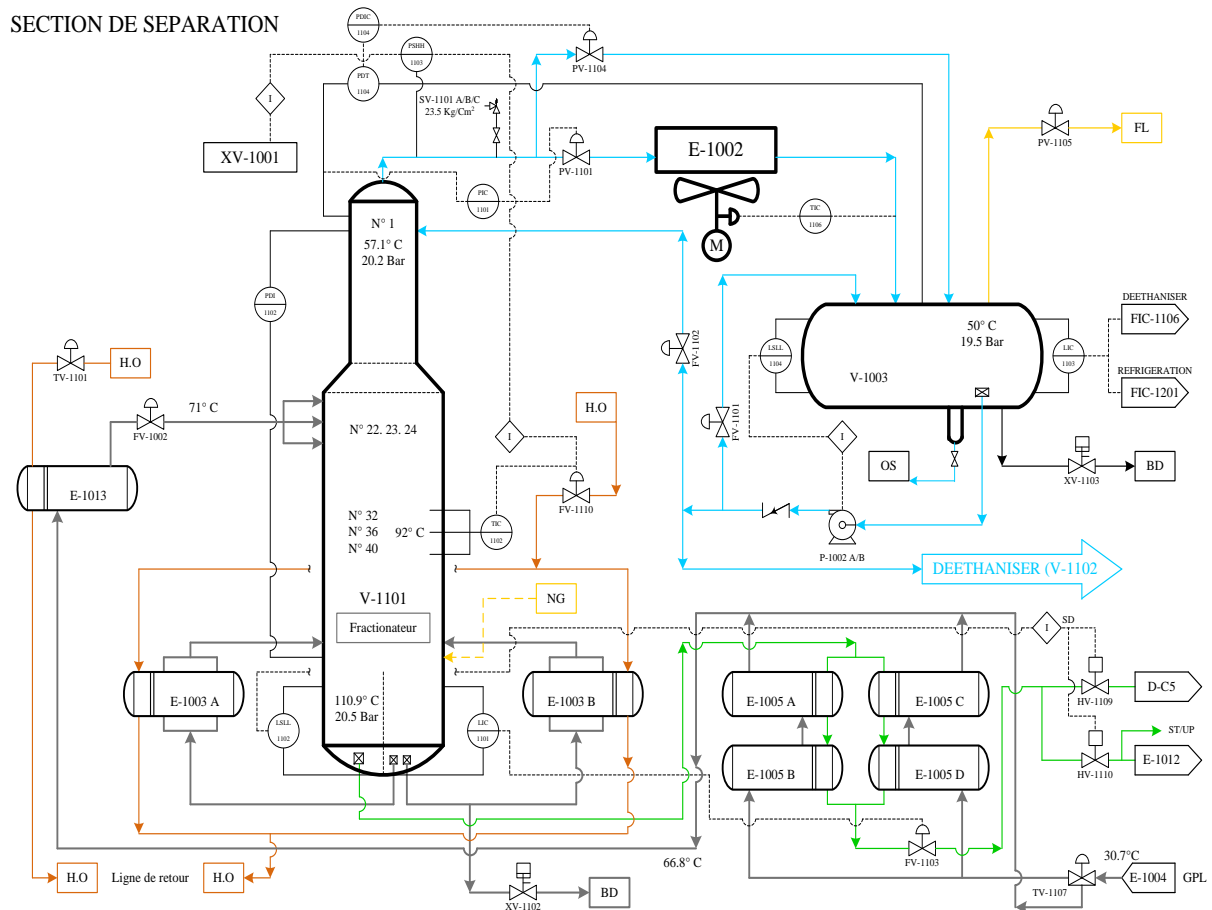


Figure I-8 : Schéma représentatif du Fractionnateur.



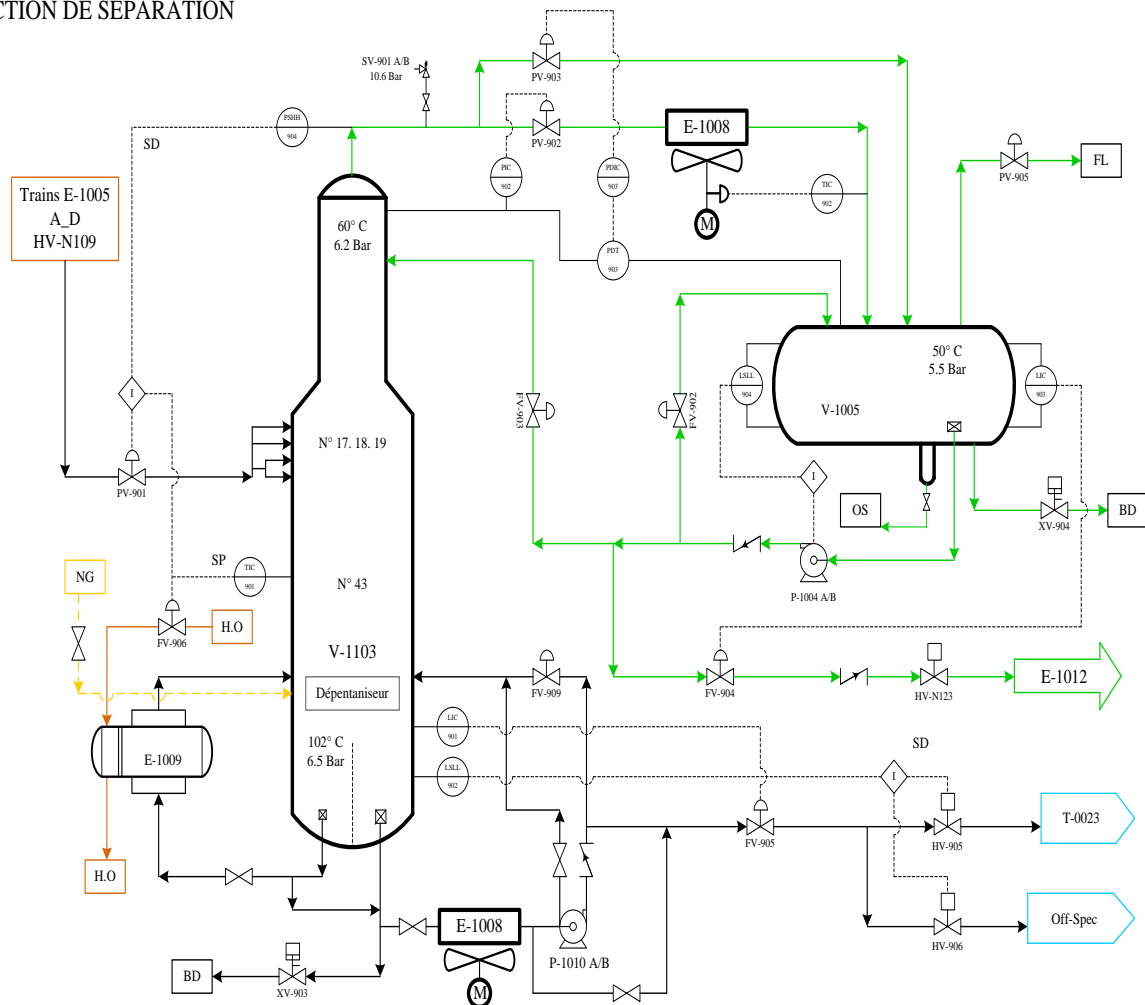
- **Dépentaniseur**

C'est une colonne composée de 50 plateaux à clapets, Cette colonne est utilisée pour éliminer les traces de pentane contenues dans le butane.

Lorsque le rapport  $C_5 / (C_4 + C_5)$  est égal ou supérieur à 1,75% mole, le dépentaniseur doit être en service.

- La température d'alimentation est de 60°C.
- La pression d'alimentation est de 7 Kg/cm<sup>2</sup>. [4]

SECTION DE SEPARATION



*Figure I-10 : Schéma représentatif du Dépentaniseur.*

### I.3.3.3 Section déshydratation de garde

La déshydratation de garde ne concerne que le propane, d'où la teneur d'hydrate ne doit pas dépasser 1 PPM. La durée d'adsorption est de 30 jours, après l'écoulement de ce temps de service, la colonne passe en régénération (avec un temps de 23 heures). [4]

SECTION DEHYDRATATION DE GARDE

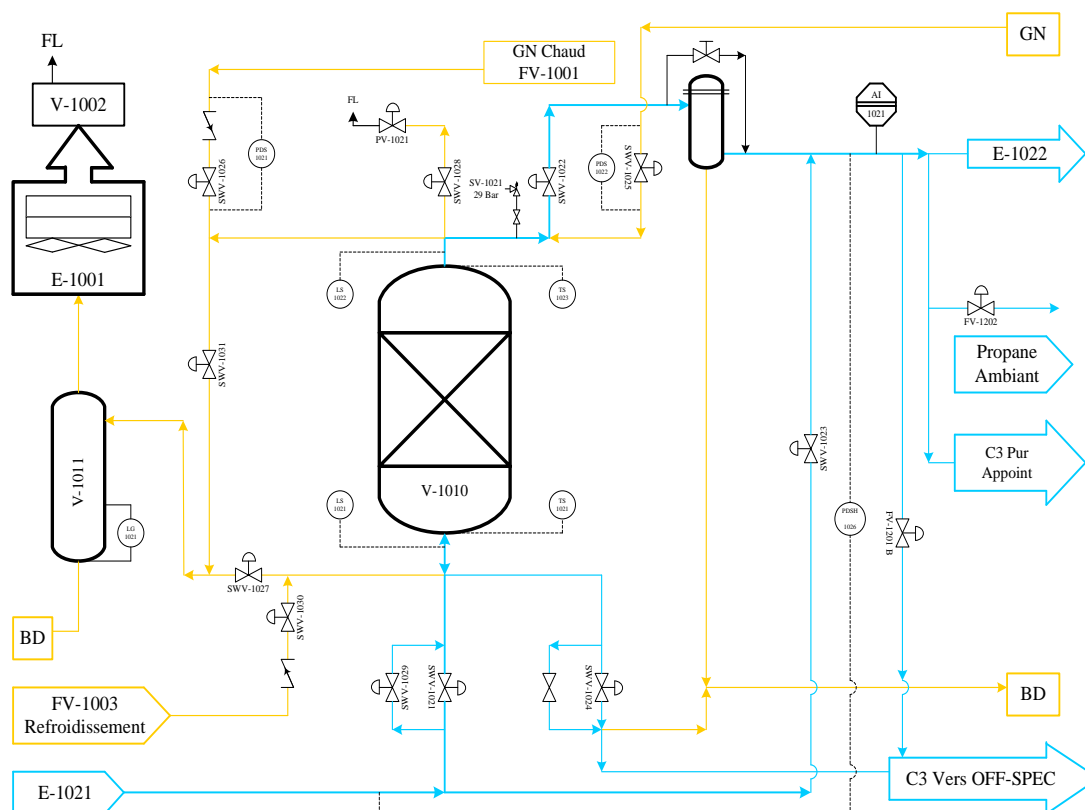


Figure I-11 : Schéma représentatif de la Section déshydratation de garde.

### I.3.3.4 Section de réfrigération

Cette section reçoit le propane et le butane de la section de séparation, les réfrigère jusqu'à atteindre les températures basses correspondant aux points de saturation proches de la pression atmosphérique ( $-38 \sim -42^{\circ}\text{C}$  pour le propane et  $-8 \sim -10^{\circ}\text{C}$  pour le butane), puis les envoie vers les bacs de stockage à basse température. Les deux produits, le propane et le butane, passent chacun par trois refroidisseurs (Schiller) pour être réfrigérés selon un cycle ouvert impliquant une détente successive à trois niveaux de pression : HP (5 bars), MP (1,5 bars) et BP (0,5 bars), par détente du propane pur après compression. Les vapeurs provenant de l'évaporation du propane réfrigérant dans les Schiller et les condenseurs de tête du dé-

éthaniseur sont collectées dans trois ballons d'aspiration HP, MP et BP pour être ensuite aspirées par le compresseur centrifuge, entraîné par une turbine à gaz dans la phase I, puis par un moteur électrique dans les phases II et III, avant d'être condensées dans des condenseurs de type Aéroréfrigérant (E-X027). [2] [4]

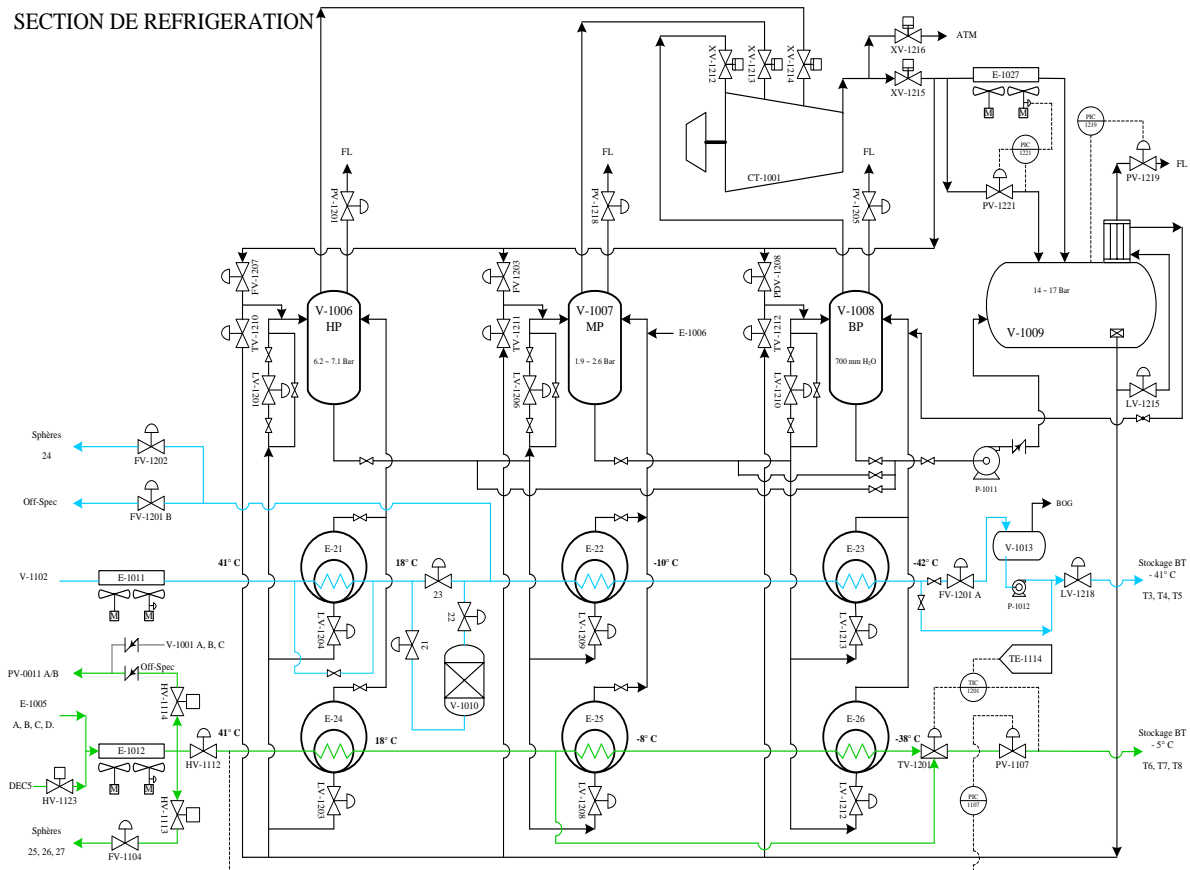
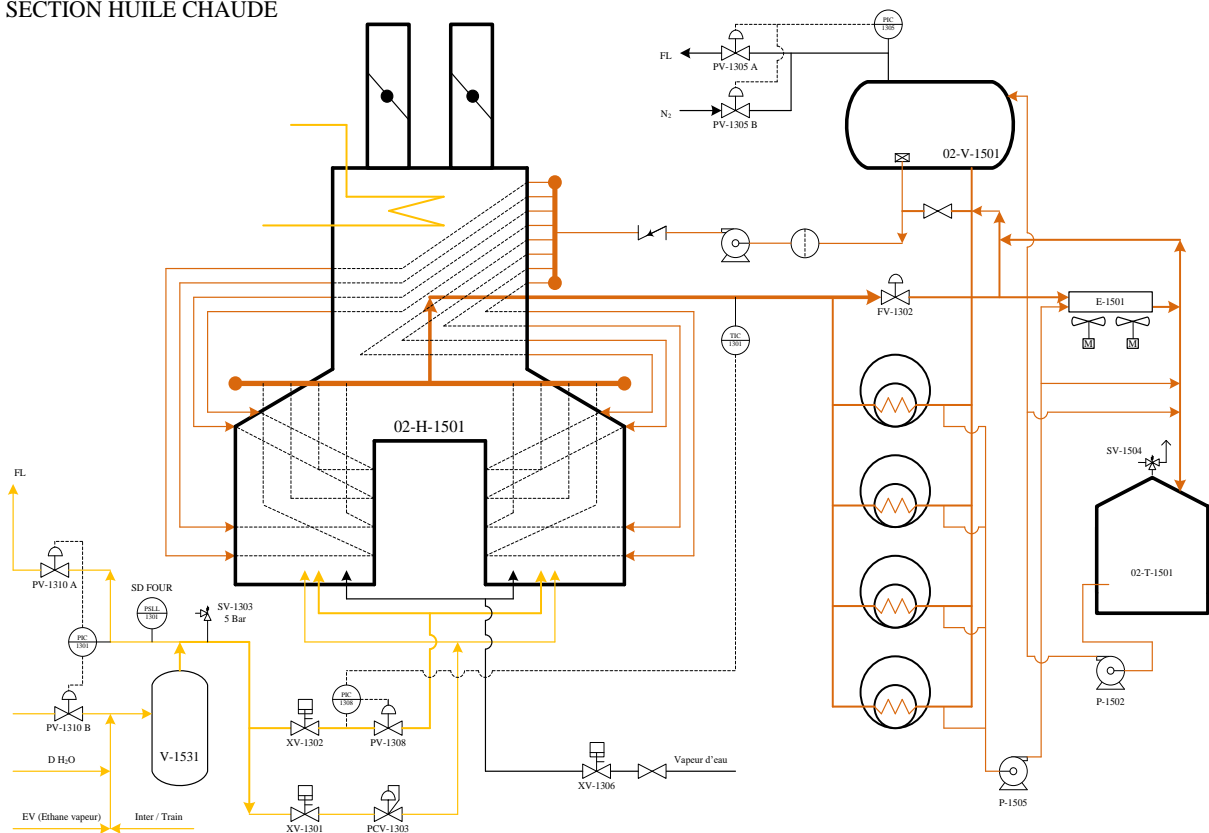


Figure I-12 : Schéma représentatif de la Section Réfrigération.

### I.3.3.5 Section d'huile chaude

Cette partie du système de fluide caloporteur (Figure I-13) sert de source de chaleur pour plusieurs équipements : le troisième préchauffeur, les rebouilleurs de la section de séparation, et le gaz naturel utilisé pour régénérer la section de déshydratation. Le circuit du fluide fonctionne comme une boucle fermée, où les pompes circulantes aspirent le fluide du ballon d'expansion et le renvoient vers le four. Dans le four, l'huile est chauffée d'abord par convection puis par radiation jusqu'à atteindre 180°C, avant d'être dirigé vers les différents équipements. À son retour, l'huile est refroidie à 130°C. [4]

## SECTION HUILE CHAUDE



*Figure I-13 : Schéma représentatif de la Section d'huile chaude.*

### I.3.4 Installations d'utilité [6]

Elles fournissent différentes zones de production avec les éléments suivants :

- **Fuel (gaz naturel)** : utilisé comme combustible.
- **Air** : elle est divisée en deux catégories :
  - Air instrument** : C'est de l'air séché après enlèvement de l'humidité, destiné à la manipulation des boucles de régulation (vanne pneumatique).
  - Air service** : utilisé pour le nettoyage et l'entretien des équipements.
- **Vapeur** : elle est produite au niveau de la chaudière à partir d'eau de mer distillée à 10 kg/cm<sup>2</sup>, elle est utilisée dans les échangeurs de chaleur.
- **Eau** : production d'eau distillée, d'eau de refroidissement pour les équipements (pompes) et d'eau potable.
- **Méthanol** : utilisé pour le dégivrage.
- **Gasoil** : utilisé pour les générateurs de secours.

- **Azote** : stocké dans un ballon et distribué selon deux circuits :  
Circuit gazeux (HELIOS).  
Circuit d'azote liquide (COGIZ).
- **Un générateur électrique** de secours de 25.617 KW.
- **Un système de sécurité vide-vite** (Blow-down).
- **Les torches** : deux à haute pression et une à basse pression, utilisées pour brûler la quantité de gaz provoquée par un dysfonctionnement des trains.

### I.3.5 Installations de stockage des produits finis

Elles comprennent Deux Sections :

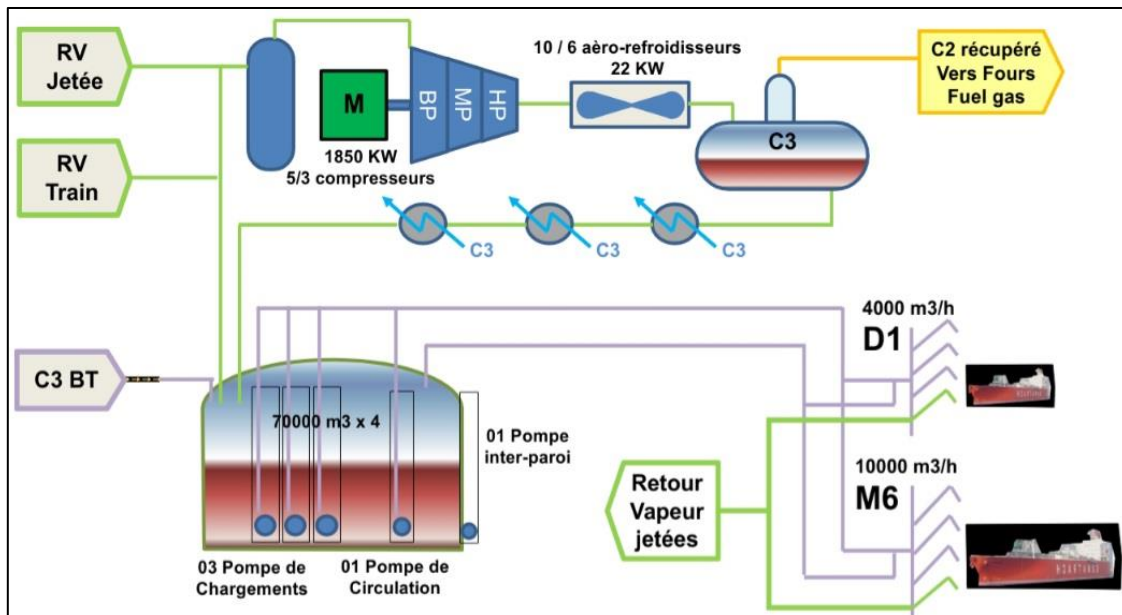
**A. Section de Stockage des Produits** : Elle comprend :

- **Section de stockage à basse température (marché international)**

Elle contient 08 bacs de stockage :

- Quatre pour le propane à  $T = -42\text{ °C}$ .
- Quatre pour le butane à  $T = -7\text{ °C}$ .

La capacité de chaque bac est de 70000 m<sup>3</sup>.



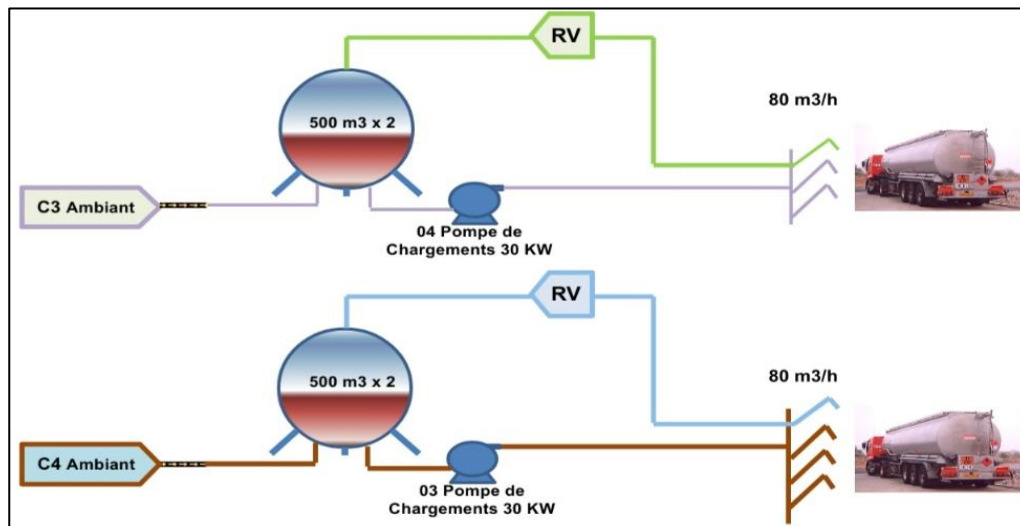
*Figure I-14 : Schéma représentatif de la Section de stockage à basse température.*

- **Section de stockage à température ambiante (marché national)**

Elle contient 05 sphères de stockage :

- Une pour le propane à  $P = 3.8-18 \text{ Kg/cm}^3$ .
- Trois pour le butane à  $P = 0.5-6.5 \text{ Kg/cm}^2$ .
- Une pour le pentane à  $P = 0.1-1.3 \text{ Kg/cm}^3$

La capacité de chaque sphère est de  $500 \text{ m}^3$ . [7]



*Figure I-15 : Schéma représentatif de la Section de stockage à température ambiante.*

## B. Section BOG (Boil of Gas) [8]

La section de reliquéfaction des vapeurs (BOG) vise à contrôler la pression des réservoirs de stockage à basse température, aussi bien pendant le stockage que lors des opérations de chargement. Les vapeurs excédentaires récupérées sont comprimées afin d'être reliquéfiées sous forme de condensats réfrigérés pour être renvoyés vers les réservoirs à basse température.



*Figure I-17 : Sphères de stockage.*



*Figure I-16 : Bacs de stockage.*



### I.3.6 Installations de chargements [9]

Les produits stockés sont envoyés aux acheteurs de deux manières différentes. Les produits à basse température destinés au marché extérieur sont expédiés par navire, tandis que ceux à température ambiante pour le marché national sont expédiés par camion.

#### A. Section de Chargement de Bateaux à Basse Températures :

Deux systèmes de chargement ont été installés au bout des jetées D1 et M6, avec le débit de chargement suivants :

- Propane... max.10.000m<sup>3</sup>/h.
- Poste D1.
- 4.000 m<sup>3</sup>/h. (les petits navires).
- Poste M6. 10.000 m<sup>3</sup>/h. (Les grands navires).
- Butane. max.10 000 m<sup>3</sup>.

#### B. Section de Chargement de Camions à Température Ambiante

Dans cette zone, le chargement de butane et de propane à température ambiante se fait à partir de quatre sphères. Ces sphères sont alimentées par les sections de séparation, (Voir le schéma de principe de procédé).



*Figure I-18 : Quai de chargement de navire du GP1/Z.*



*Figure I-19 : Rampe de chargement de camion du GP1/Z.*

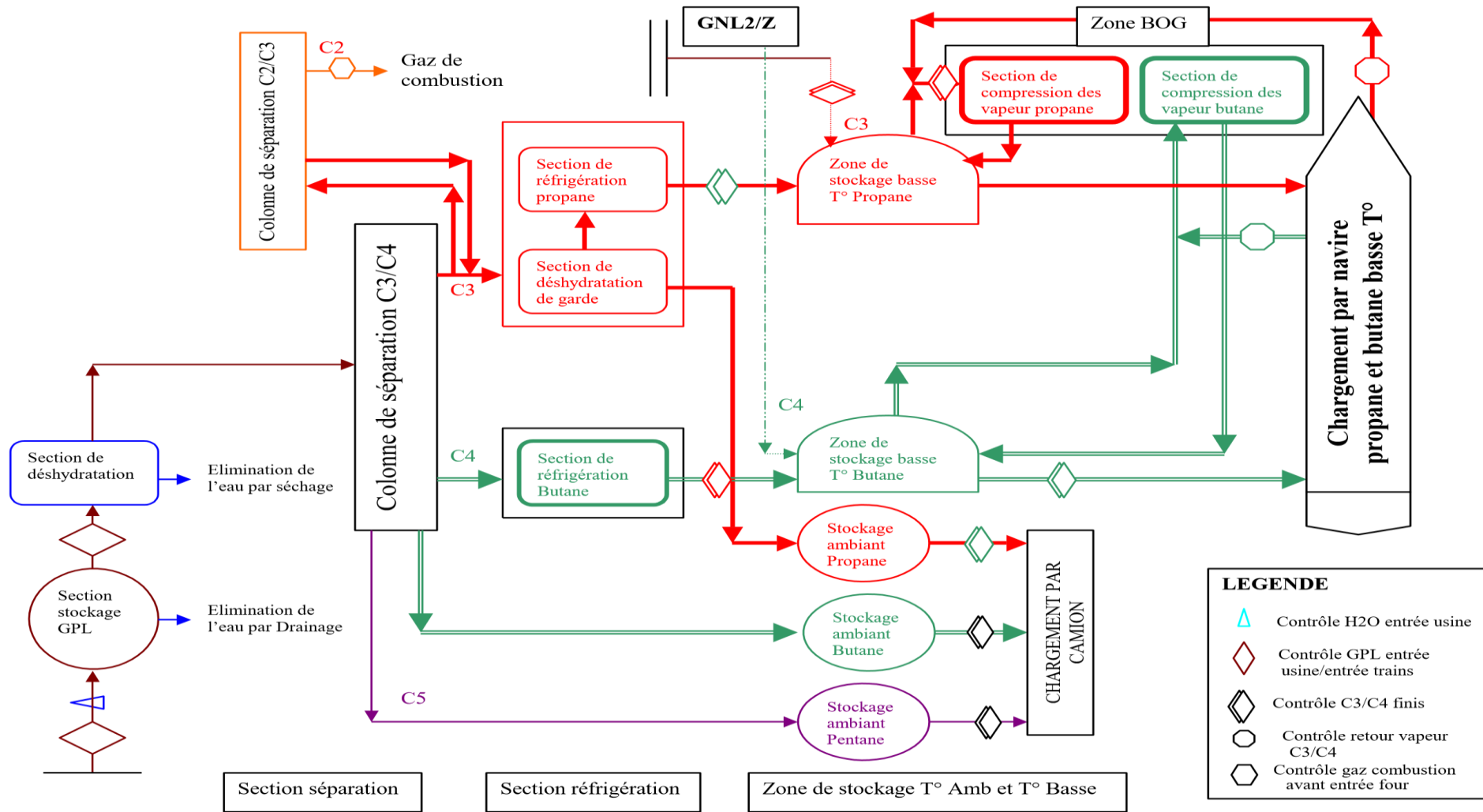


Figure I-20 : Schéma principale de procédé du (GPL).

## **I.4 Généralité sur le GPL**

### **I.4.1 Historique**

La découverte du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) est plutôt récente en comparaison de celle du pétrole, remontant au 24 décembre 1910 en Virginie, aux États-Unis. C'est à cette date que l'ingénieur de la Riverside Oil Company, H. Stukeman, parvint pour la première fois à produire 658 premiers litres de GPL liquide. L'utilisation initiale du GPL dans l'oxycoupage en 1911 a démontré qu'il était un excellent substitut à l'acétylène.

En 1912, des essais d'installation domestique ont été réalisés, suivis par les premiers pas de la carburation automobile aux GPL la même année. [10]

### **I.4.2 Définition du GPL**

Le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) est un composé d'hydrocarbures présents sous forme gazeuse dans des conditions normales de température et de pression. Ces hydrocarbures ont la capacité de passer à l'état liquide en diminuant la température, en augmentant la pression, ou en utilisant une combinaison des deux méthodes. Il s'agit principalement de butane et de propane. Cette caractéristique permet de les stocker dans un volume réduit (1 m<sup>3</sup> de GPL liquide occupe un volume de 225 m<sup>3</sup> sous forme gazeuse).

Les GPL, qui appartiennent à la famille des paraffines, sont principalement composés de CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, et C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>. [11] [12]

### **I.4.3 Procédés d'obtentions du GPL**

Les gaz de pétrole liquéfiés sont principalement obtenus de trois façons :

- Par distillation de Pétrole brut ou par cracking et reforming des produits plus lourds dans les raffineries.
- Par séparation de l'essence du gaz naturel pour récupérer les condensats comme le propane, le butane et les essences légères.
- Par la récupération directe des gaz associés au pétrole dans les champs de production.[13]

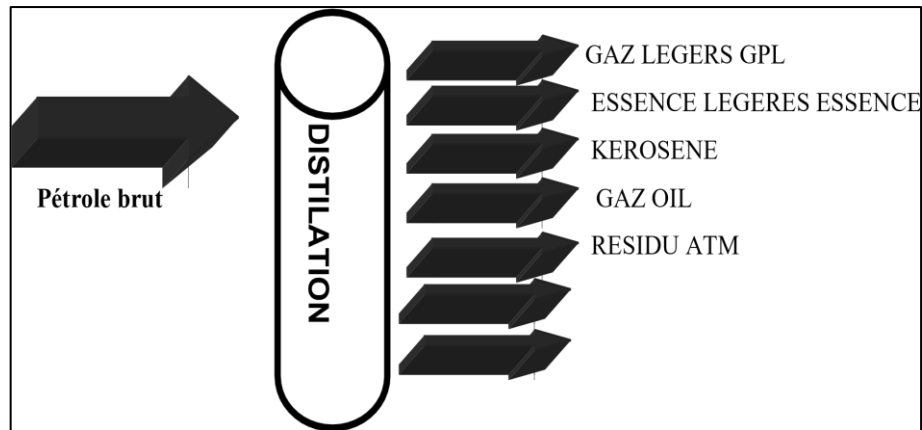


Figure I-21 : Récupération des GPL à partir du pétrole brut.

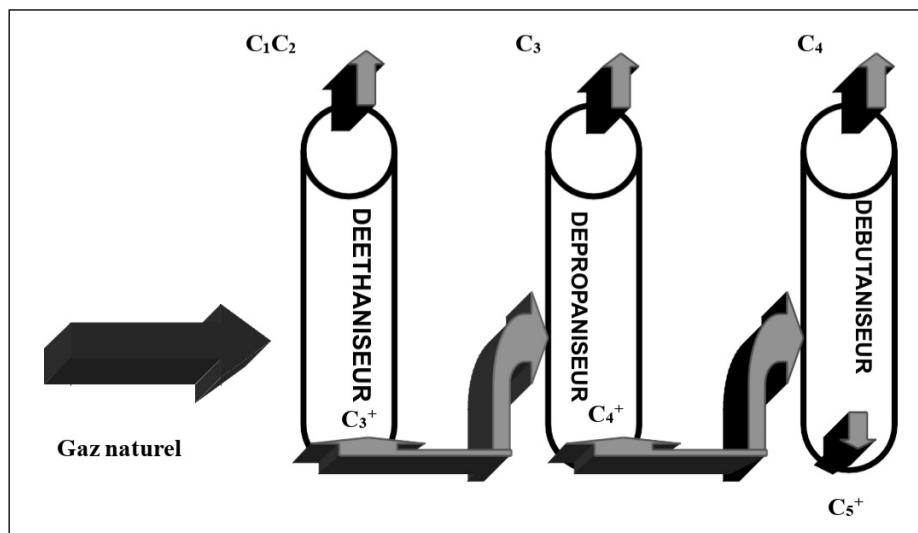


Figure I-22 : Récupération du GPL à partir des champs de GN.

#### I.4.4 Propriétés du GPL [14]

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) possède les caractéristiques suivantes :

- a) **Odeur et couleur** : Le GPL est incolore et pratiquement inodore, mais pour des raisons de sécurité, une odeur particulière est ajoutée grâce à l'utilisation de produits appropriés (mercaptans).
- b) **Température d'ébullition** : À pression atmosphérique, les températures d'ébullition sont de  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour le butane,  $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour le propane et  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour le GPL.
- c) **Tension de vapeur** : À  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la tension de vapeur du butane est de 2 bars et celle du propane est de 8 bars. Cette valeur ne doit pas dépasser un certain seuil en cas de chaleur excessive (été) pour des raisons de sécurité.

- d) **Densité** : À température et pression normales, le GPL est plus lourd que l'air, sa densité diminuant avec l'augmentation de la température, par exemple, 0,534 à 38 °C.
- e) **Pouvoir calorifique** : Le pouvoir calorifique du GPL est élevé, il est égal à 12 200 Kcal/Nm<sup>3</sup> pour le propane et 11 800 Kcal/Nm<sup>3</sup> pour le butane.
- f) **Indice d'octane** : Le GPL se distingue par un indice d'octane recherché (RON) naturellement élevé, atteignant facilement 98. En outre, son indice d'octane moteur (MON) est légèrement supérieur à celui des essences classiques.
- g) **La corrosion** : Le GPL ne corrode pas l'acier, mais il peut être corrosif pour le cuivre, les alliages de cuivre ou d'aluminium.
- h) **Explosibilité et inflammabilité** : Lorsqu'il se mélange à l'air ou à l'oxygène, le GPL devient un gaz explosif. Sa limite d'inflammabilité est très basse, et son faible point d'éclair entraîne une inflammation facile en cas de fuite.
- i) **Toxicité physiologique** : Inhaler une grande quantité de GPL peut entraîner un effet légèrement narcotique. La concentration acceptable dans l'air est de 1 ppm pour le propane.

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

Propriétés	Propane	n-butane
Poids moléculaire (g/mol)	44,096	58,123
Point de fusion (°C)	-187,7	-138
Chaleur latente de fusion (kJ/kg)	94,98	80,165
Masse volumique de la phase liquide à 1, 013 bars au point d'ébullition (kg/m <sup>3</sup> )	582	601.4
Point d'ébullition (1,013 bar) °C	-42,1	-0,5
Chaleur latente de vaporisation (1,013 bar au point d'ébullition) kJ/kg	425,31	385,6
Pression de vapeur à 21 °C (bar)	8,7	1,2
Température critique (°C)	96,6	152

<b>Pression critique (bar)</b>	42,5	37,96
<b>Masse volumique du gaz à 1,013 bar au point d'ébullition (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2,423	2,7
<b>Facteur de compressibilité (z) à 1,013 bar et 15 °C</b>	1,0193	0,9625
<b>Chaleur spécifique à pression constante (Cp) à 1 bar et 25 °C (kJ/mole. °K)</b>	0,075	0,096
<b>Chaleur spécifique à volume constant (Cv) à 1 bar et 25 °C (kJ/ mole °K)</b>	0,066	0,088
<b>Température d'auto-inflammation (°C)</b>	470	365

#### I.4.5 Domaine d'utilisation du GPL [13] [15]

Les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) se profilent comme une source d'énergie prometteuse, car la demande mondiale continue de croître, que ce soit pour la pétrochimie ou pour leurs applications traditionnelles en tant que combustible. Parmi les différentes utilisations des GPL, on peut distinguer :

- **Applications domestiques**

Les GPL sont largement utilisés dans le chauffage et la climatisation, ce qui en fait l'une de leurs applications les plus importantes.

- **Le GPL/C (carburant)**

Les Gaz de Pétrole Liquéfiés peuvent servir de carburant, plus communément appelé GPL/C. Sa combustion génère très peu d'émissions polluantes en raison de sa composition en 55% de butane et 45% de propane. Dépourvu de soufre, de plomb et de benzène, le GPL est considéré comme un carburant propre et économique.

- **Applications pétrochimiques**

Le GPL est largement utilisé dans l'industrie pétrochimique, enregistrant une croissance mondiale d'environ 10% :

- Il est principalement utilisé comme charge pour le vapocraqueur afin de produire des oléfines.

- Le butane et le propane sont obtenus dans la production du butadiène et du propylène, qui sont des matières premières essentielles pour la synthèse des caoutchoucs.
- Le butane est utilisé dans la fabrication de MTBE, comme booster qui améliore l'indice d'octane des essences,
- Il ainsi utilisé comme charge pour les unités d'alcoylation.
- Le propane et le butane sont également utilisés pour produire de l'acétaldéhyde, du formaldéhyde, de l'acide acétique et de l'acétone.

#### ▪ Applications agricoles

Activités agricoles et l'élevage, les GPL peuvent être utilisés comme substituts aux produits chimiques pour le désherbage.

#### ▪ Usage dans les transports

Utilisation comme carburant dans des véhicules, des bateaux de plaisance.

### I.4.6 Caractéristiques du propane et du butane commercial

Les caractéristiques du propane et du butane en tant que produits commerciaux sont répertoriées dans le tableau ci-dessous (Tableau I-2) :

*Tableau I-2 : Caractéristiques du propane et du butane commercial du GP1/Z. [16]*

Caractéristiques	Le propane	Le butane	Normes des méthodes d'analyses utilisées
Masse molaire (g/mole)	44	58	/
Densité à 15°C	0.5068	0.5772	ASTMD 2598-1657
Tension vapeur relative à 37,8(Kg/cm <sup>2</sup> )	12.7	3.1	ASTMD 2598-1267
Teneur en eau	Absence d'eau	Absence d'eau	ASTMD 2713-76
Point d'ébullition à 760 mm Hg (°C)	-40	0	ASTM D 1837



*Figure I-23 : Structure chimique du butane et propane.*

#### **I.4.7 Risques du GPL [15]**

- Les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) sont souvent stockés sous pression à l'état liquide, et en cas de fuite, l'évaporation rapide du liquide peut produire un grand volume de gaz inflammable.

- Le gaz peut s'enflammer lorsque sa concentration dans l'air atteint environ 2% de son volume total. Par conséquent, une petite quantité de gaz mélangée à l'air peut être suffisante pour produire un mélange inflammable qui peut être allumé par une étincelle ou un élément chaud provenant d'un point de fuite, même à distance.

- L'évaporation des liquides de GPL peut provoquer des brûlures sévères, donc il est important de porter des vêtements de protection tels que des gants et des lunettes.



A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and a horizontal strip at the top, both ending in small circular curls.

## **CHAPITRE II**

**SECTION DE DESHYDRATATION**

**DE LA CHARGE**

## II.1 Introduction

Afin de maintenir nos équipements en aval en bon état et d'empêcher les perturbations liées au givrage et à la formation d'hydrates, La déshydratation de la charge provenant des divers champs est réalisée pour éliminer l'eau dissoute dans le GPL brut.

Chaque train est équipé d'une section de déshydratation de la charge pour abaisser la teneur en eau dissoute dans le GPL de 100 ppm à moins de 5 ppm.

A n'importe quel moment, une colonne est en service pour l'adsorption, une deuxième est en cours de régénération, pendant que la troisième est en attente.

Une fois le temps d'adsorption de 36 heures écoulé, la colonne en attente entre en service, la colonne qui était service est mise en régénération. À ce stade, la troisième colonne a terminé son cycle de régénération et est mise en attente.

Durant le processus d'adsorption, le GPL circule de bas en haut dans la colonne. Il convient de souligner que seules deux colonnes peuvent être utilisées pour la déshydratation de la charge, permettant ainsi à une colonne d'être en maintenance tandis que les deux autres assurent l'adsorption.

## II.2 Description générale

### II.2.1 Equipements Statiques (Train-100)

La conception de l'unité de déshydratation de charge vise à réduire la teneur en eau du GPL de 100 à 5 ppm, constituée de divers équipements, incluant : [17]

- Sécheurs 02-V-1001A/B/C.
- Séparateur démister 02-V-1002.
- Panneau Local 02-M-1001.
- Aéros refroidisseurs 02-E-1001A/B.
- Analyseur 02-AI-1001.
- Réservoir (Tampon) d'Air Instrument 02-V-1020.
- Filtres 02-M-1020A/B « entrée charge », 02-M-1021A/B « sortie charge ».

## II.2.2 Vanneries déshydrateur de charge (Train 100)

### a) Vannes individuelles

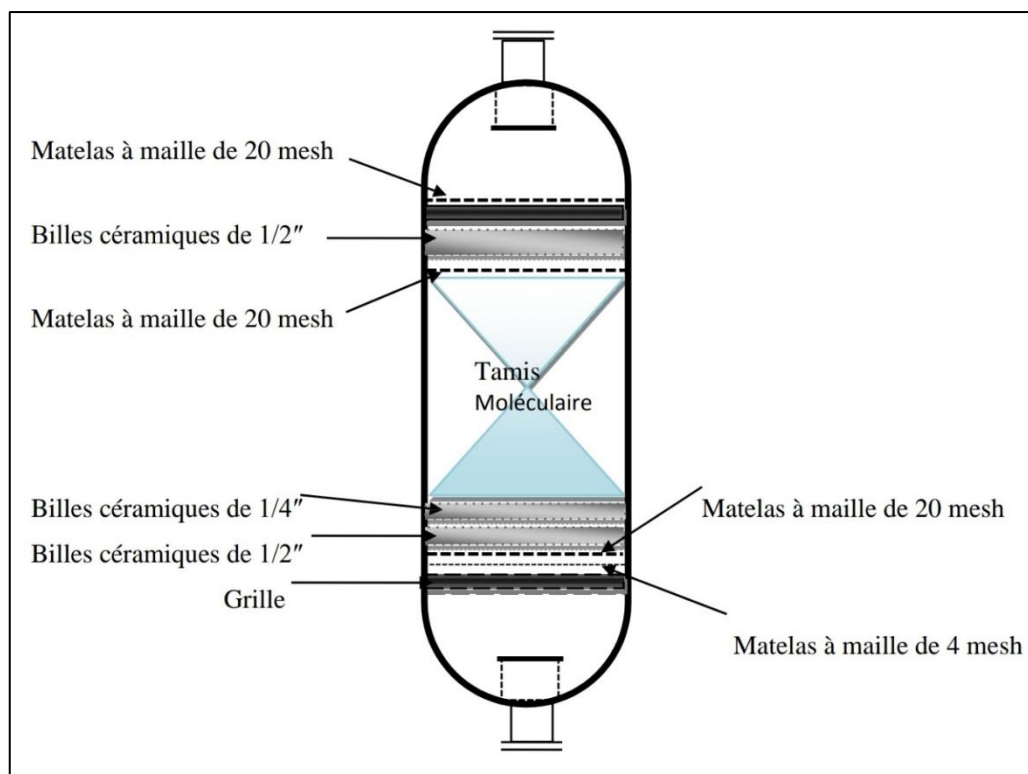
- SWV. 1001(A/B/C) : Entrée GPL ligne 8".
- SWV. 1002(A/B/C) : Sortie GPL ligne 8".
- SWV. 1003(A/B/C) : Purge du GPL ligne 1,5".
- SWV. 1004(A/B/C) : Entrée Gaz de Purge 1,5".
- SWV. 1007(A/B/C) : Sortie Gaz de Réchauffage et Entrée Gaz de refroidissement 4".
- SWV. 1010(A/B/C) : Entée Gaz de Réchauffage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

### b) Vannes communes

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

## II.3 Description interne du déshydrateur

- Une conduite d'entrée équipé d'un distributeur de charge GPL situé en bas du déshydrateur.
- Une grille composée des matelas à maille de 4 mesh et de 20 mesh soutenant deux couches de billes céramiques de diamètres différents (½" et ¼").
- Une charge d'Alumine active.
- Un matelas avec un maille de 20 mesh situé en haut, soutenant une couche supplémentaire de billes céramiques de diamètre ½".
- Un matelas avec un maille de 20 mesh recouvrant les billes céramiques en haut.
- Un filtre qui prévient la fuite de l'alumine.
- Une conduite de sortie pour alimenter le fractionnateur. [18]



*Figure 0-1 : Schéma de déshydrateur.*

## II.4 Circuit de GPL

Le GPL brut qui provient de la section des sphères d'alimentation est acheminé aux trains de procédé par des pompes de transfert (P-0011).

Il traverse tout d'abord un densimètre à l'entrée du train 100, du train 500 et du train 700, ensuite une vanne de sécurité (XV-N001), un clapet anti-retour, et un transmetteur de débit (FT) connecté avec le (DT) pour assurer un contrôle stable du débit en amont de la colonne du fractionnateur via le FIC-N002. Ensuite, le GPL passe par un analyseur d'eau en service avant d'entrer dans les filtres d'entrée de charge (M-N020A/B) équipés du PDG-(N006) qui détecte un encrassement de  $\Delta P = 0,4 \text{ Kg/cm}^2$ .

Le GPL entre ensuite dans la section de déshydratation à travers la (SWV-N001) pour être soumis au processus de déshydratation dans le déshydrateur en service.

À la sortie du déshydrateur par la (SWV-N002), le GPL déshydraté est filtré à nouveau dans les filtres de sortie (M-N021A/B) équipés d'un (PDG-N004) :  $\Delta P = 0.4 \text{ Kg/cm}^2$ .

Le (PDSH-N007) est positionné entre la ligne d'alimentation et la sortie vers la séparation pour détecter une différence de pression haute en déclenchant une alarme commune

$\Delta P = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ . Après un temps précis et contrôlé par une minuterie nommée (TIMER), le tamis moléculaire saturé du déshydrateur utilisé pour l'adsorption doit être régénéré pour être réutilisé.

Pendant ce temps, le déshydrateur en attente se met en service automatiquement selon une séquence chronologique. [18]

## II.5 Cycle de régénération [17]

Les étapes du cycle de régénération sont illustrées dans le tableau II-1.

*Tableau 0-1 : Cycle de régénération.*

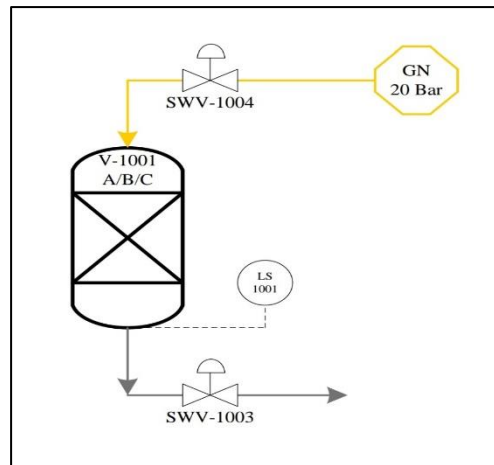
Etapes	Temps (h)	P (Kg/cm <sup>2</sup> )	T (°C)
<b>Drainage</b>	1	20	30
<b>Dépressurisation</b>	0,5	4,5	30
<b>Réchauffage</b>	11	4,5	280
<b>Refroidissement</b>	5	4,5	12,7
<b>Pressurisation</b>	0,5	20	45
<b>Remplissage</b>	1	30	30

### II.5.1 Drainage

Dès que le V-1001B est mis en service, la vanne 2A se ferme. Une fois cette vanne fermée, la séquence de régénération débute en évacuant le GPL restant dans la colonne d'adsorption. Le GPL brut est ensuite envoyé vers les réservoirs sphériques d'alimentation sous pression de gaz naturel (20 kg/cm<sup>2</sup>) eff, introduit en haut de la colonne. En ouvrant les vannes 3A et 4A, le GPL est dirigé vers les réservoirs sphériques d'alimentation et se retrouve sous forme liquide. À ce stade, le contact de niveau LS-1 est mise en ligne.

Dès que le niveau de liquide atteint LS-1, la fermeture de la vanne 3A est suivie par celle de la vanne 4A.

L'opération de drainage est alors complète et LS-1 est désactivé. Le temps estimé pour le drainage est d'environ une heure. [17]

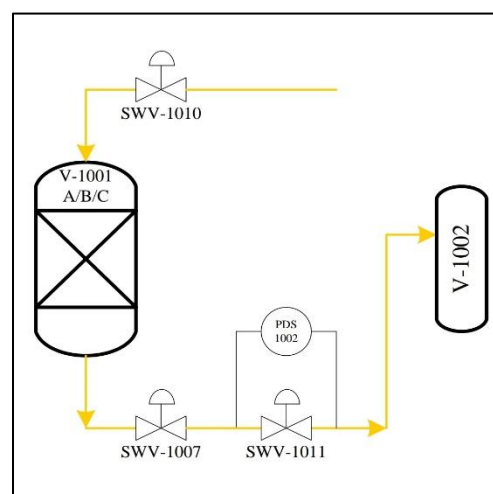


*Figure 0-2 : Séquence de drainage.*

### II.5.2 Dépressurisation

Après avoir terminé le drainage complet de la colonne d'adsorption, la pression dans le V-1001A atteint 20 kg/cm<sup>2</sup> eff puis doit être abaissée à 4,5 kg/cm<sup>2</sup> eff avant de pouvoir commencer la séquence de chauffage.

Avec les vannes 3A et 4A fermées, la commande automatique chronologique ouvre d'abord la vanne 11, puis la vanne 7A, et active le contact de pression différentielle PDS-2. Le V-1001A est ensuite dépressurisé lentement vers le réseau de fuel gaz. Une fois que PDS-2 indique un débit zéro, la vanne 11 se ferme automatiquement tandis que la vanne 7A reste ouverte, maintenant la pression dans la colonne à 4,5 kg/cm<sup>3</sup>. Cette opération de dépressurisation prend environ une demi-heure. [17]



*Figure 0-3 : Séquence de dépressurisation.*

### II.5.3 Chauffage

La phase de chauffage est l'étape principale de la séquence de régénération, au cours de laquelle toute l'eau adsorbée est éliminée des tamis moléculaires.

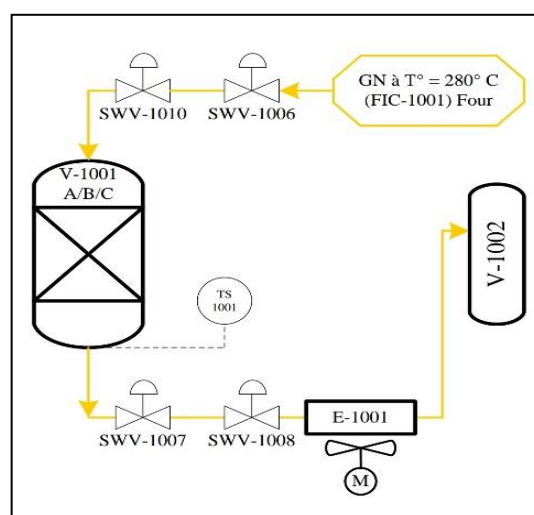
Le lit de tamis moléculaires est progressivement chauffé de haut en bas à l'aide de gaz naturel chaud provenant du four de fluide caloporteur chauffé à 280°C.

Pour démarrer la séquence de chauffage, les vannes 8, 6 et 10A sont ouvertes. Un débit constant de gaz est introduit dans le lit par le contrôleur de débit de la canalisation de gaz chaud, permettant au lit de se réchauffer lentement afin de chasser l'eau entraînée.

L'aéroréfrigérant E-1001 est en ligne dans le but de refroidir le gaz sortant du lit et de condenser une partie de l'eau présente dans ce gaz. Le gaz refroidi passe ensuite par le séparateur de drainage V-1002, où l'eau libre est séparée et dirigée vers les égouts des eaux huileuses en fonction du niveau de contrôle.

Le gaz refroidi est ensuite dirigé vers le réseau de fuel gaz, Tout condensat d'hydrocarbures se formant au-dessus du niveau de l'eau libre est dirigé vers le réseau de purge sous contrôle de niveau, le gaz refroidi peut également être dirigé directement vers la torche sous contrôle de pression.

L'opération de chauffage dure 11 heures, puis le cycle est arrêté par le programmeur et TS-1 lorsque le fond du lit atteint la température de régénération de 250°C. [17]



**Figure 0-4 : Séquence de chauffage.**

### II.5.4 Refroidissement

Le lit commence à se refroidir à partir du fond vers le haut, en opposition à l'opération de chauffage. Pendant la séquence de refroidissement, on utilise du gaz naturel froid à une température de 12.7 °C.

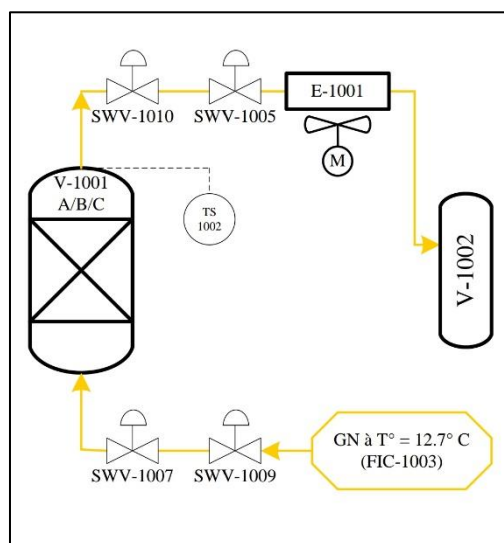
Pour initialiser le refroidissement, les vannes 5 et 9 s'ouvrent et le TS-2 est mis en ligne. Les vannes 7A et 10A restent ouvertes après la séquence de chauffage, tandis que le E-1001 reste en service.

Le débit de gaz froid entrant dans le lit est contrôlé par un contrôleur de débit.

L'opération de refroidissement dure 5 heures et se termine lorsque le TS-2 indique que la partie supérieure du lit s'est suffisamment refroidi (45 °C).

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

Une fois le refroidissement terminé, les vannes 9, 7A et 5 du lit se ferment, et le TS-2 est désactivé. [17]



*Figure 0-5 : Séquence de refroidissement.*

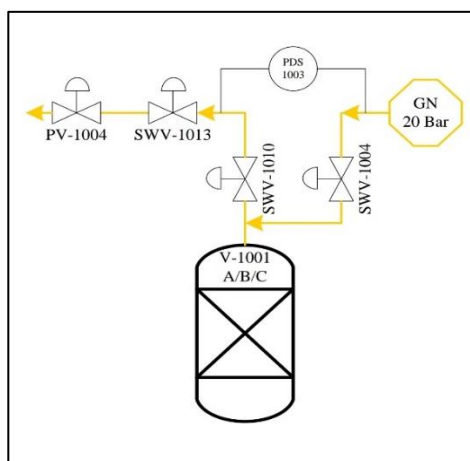


### II.5.5 Remise sous pression

Avant de pouvoir réintroduire du GPL liquide dans la colonne, il est nécessaire de repressuriser V- 1001A en utilisant du gaz naturel (20 kg/cm<sup>2</sup> eff ) afin d'éviter une détente du GPL brut et ainsi prévenir toute perte de produit.

La remise sous pression implique l'introduction d'un faible débit de gaz naturel à haute pression dans la colonne, avec l'ouverture automatique des vannes 13 et 4A et l'activation du PDS-3. La pression augmente dans la colonne jusqu'à ce que PDS-3 atteigne son point de tarage. Ensuite, la vanne 4A se ferme, et PDS-3 est désactivé. La pression dans V-1001 atteint alors 20 kg/cm<sup>2</sup> eff.

Cette opération de remise sous pression dure environ une demi-heure. [17]



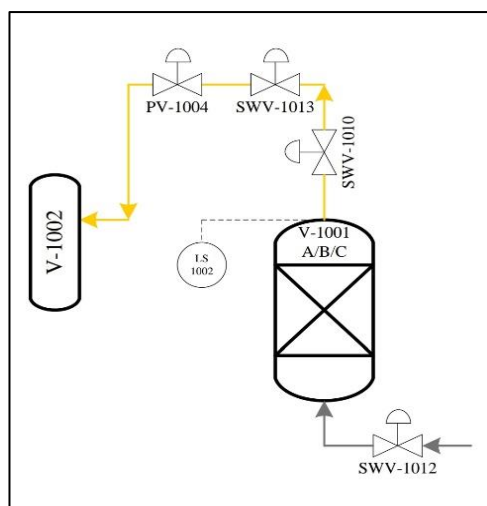
*Figure 0-6 : Séquence de pressurisation.*

### II.5.6 Remplissage en liquide

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

Pendant que le GPL liquide remonte dans la colonne, le gaz est évacué sous contrôle de pression en tête. Une fois que le liquide atteint le niveau LS-2, la vanne 12A se ferme.

Cette opération prend environ une heure. V-1001A termine alors son cycle de régénération et passe en réserve. Habituellement, la disponibilité en réserve dure 53 heures, tandis que la régénération totale se fait en 19 heures. Le cycle d'adsorption de V-1001B se termine 17 heures plus tard, et son cycle de régénération débute. V-1001C est mis en service et commence son cycle d'adsorption pendant que V-1001A reste en réserve. [17]



*Figure 0-7 : Séquence de remplissage.*

La section de déshydratation de charge (train 100) est illustrée dans les figures ci-dessous.



*Figure 0-8 : Colonnes de déshydratation.*

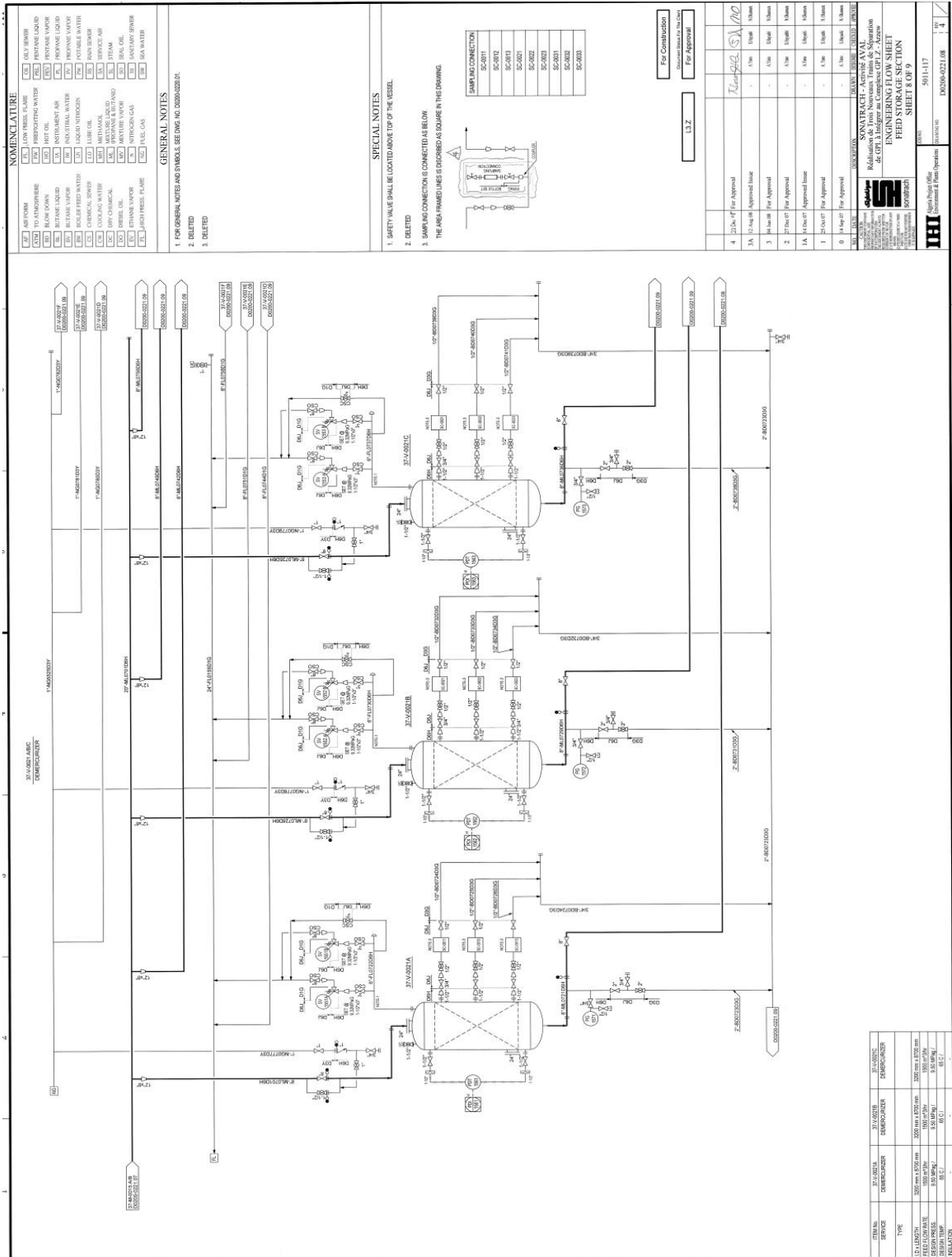
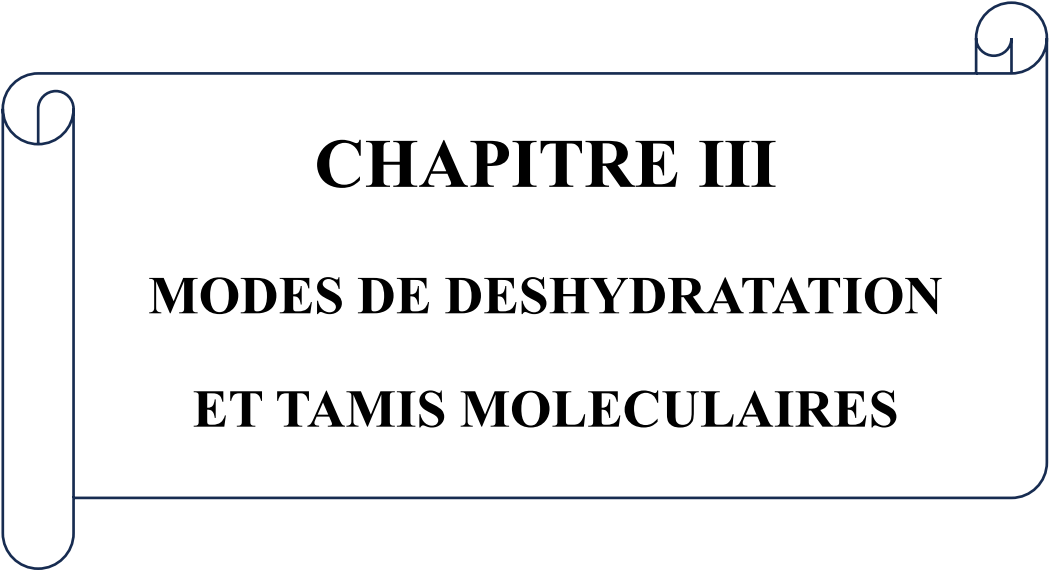


Figure 0-9 : Schéma de la section de déshydratation. [17]



**CHAPITRE III**

**MODES DE DESHYDRATATION**

**ET TAMIS MOLECULAIRES**

### III.1 Introduction

La présence d'eau dans le GPL peut causer divers problèmes lors de l'exploitation en fonction des conditions de température et de pression présentes dans une installation, entraînant la formation d'hydrates.

Pour prévenir ce problème, il est indispensable de diminuer la teneur en eau présente dans le GPL en utilisant des techniques de traitement adéquates. On a eu recours à diverses méthodes pour empêcher le blocage des canalisations de transport ou des installations de traitement des GPL par les hydrates. La méthode la plus répandue consiste à réduire la teneur en eau par déshydratation.

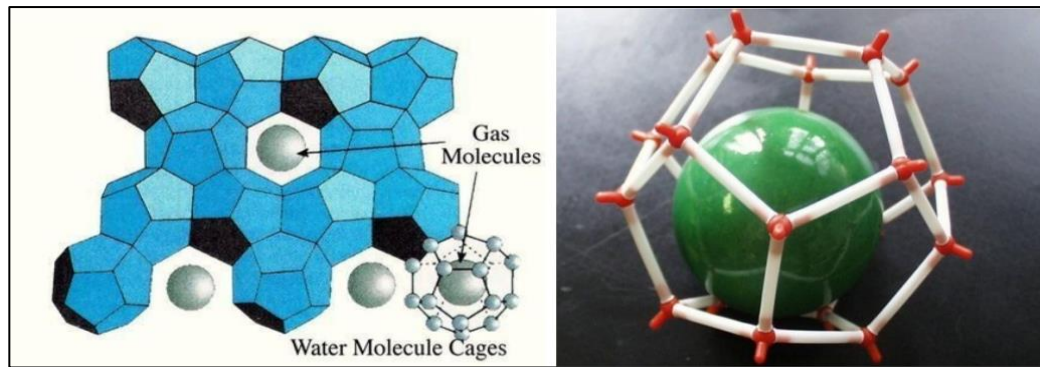
La déshydratation du GPL est effectuée avec divers types de procédés : absorption, adsorption, etc. Dans la suite, nous détaillerons la déshydratation par adsorption.

## III.2 LES HYDRATES

### III.2.1 Définition des hydrates

Les hydrates sont des structures solides où l'eau est liée aux hydrocarbures par des liaisons physiques et chimiques. Ils se présentent sous forme de cristaux semblables à de la neige, flottant à la surface de l'eau avec une masse volumique de 800 à 900 Kg/m<sup>3</sup>. Leur formation se produit sous des conditions spécifiques de pression et de température, notamment dans les canalisations de transport d'hydrocarbures où ils peuvent entraîner une obstruction complète.

Les hydrates sont des composés d'inclusion qui appartiennent à la classe des clathrates. Ce sont des solides cristallisés qui renferment certains atomes ou molécules piégés dans des cages formées par un autre type de molécules. Lorsque des liaisons d'hydrogène relient les molécules d'eau pour créer un réseau cristallin, et que les cavités contiennent des molécules gazeuses, les clathrates formées sont connus sous le nom d'hydrates. [19]



*Figure III-1 : Structures des hydrates.*

### III.2.2 Types des hydrates [20]

Il existe deux types d'hydrates distincts :

- 1- Les hydrates avec des molécules de petite taille comprenant :
  - Le méthane associé à 6 à 7 molécules d'eau ( $\text{CH}_4, 7 \text{H}_2\text{O}$ ).
  - L'éthane associé à 7 molécules d'eau ( $\text{C}_2\text{H}_6, 7 \text{H}_2\text{O}$ ).
  - Le dioxyde de carbone associé à 6 à 7 molécules d'eau ( $\text{CO}_2, 7 \text{H}_2\text{O}$ ).
- 2- Les hydrates avec des molécules de grande taille liées à 17 molécules d'eau : ( $\text{C}_3\text{H}_8, 17\text{H}_2\text{O}$ ) et ( $\text{C}_4\text{H}_{10}, 17\text{H}_2\text{O}$ ).

Les molécules de taille supérieure à n-C<sub>4</sub> sont trop grandes pour pénétrer dans le réseau cristallin, inhibant ainsi la formation des hydrates.

### III.2.3 Conditions de formation des hydrates [18]

Au sein de cette unité, la formation des hydrates peut poser des risques spécifiques à des positions bien définies où les conditions thermodynamiques permettent cette formation, les conditions qui encouragent cette formation sont les suivantes :

➤ **Conditions primaires**

- Présence d'eau dans le gaz.
- Les basses températures (au-dessus de 0 °C).
- Les hautes pressions.

➤ **Conditions secondaires**

- Les fluctuations de pression.
- Les vitesses de circulation élevées induisant une turbulence importante.
- L'agitation.
- La présence de petits cristaux d'hydrates qui peuvent agir comme catalyseurs de réaction.
- Un lieu physique pour la formation d'hydrates, comme des tuyaux et des orifices.

### III.2.4 Prévention des hydrates

Pour empêcher la formation d'hydrates, il est possible de modifier les conditions thermodynamiques en augmentant la température à une pression constante ou en diminuant la pression à une température donnée.

Si ces ajustements ne sont pas réalisables, il est alors nécessaire de réduire la teneur en eau du gaz par un processus de séchage ou d'utiliser des inhibiteurs.

Ces derniers fonctionnent comme des antigels, étant des solvants miscibles en phase aqueuse qui altèrent la fugacité de l'eau, abaissant ainsi la température de formation des hydrates. [21]

Les méthodes de prévention d'hydrates sont :

**a) Chauffage**

Afin d'éviter la formation d'hydrates, une solution efficace pour les courtes lignes de collecte consiste à isoler la conduite et à ajouter un chauffage d'appoint électrique. Ce chauffage peut être réalisé à l'aide de rubans chauffants électriques ou par induction d'un courant électrique superficiel dans la conduite isolée. [22]

**b) Réductions de pression**

Baisser la pression à une température donnée est une méthode utilisée pour éviter la formation d'hydrates. Cependant, cette réduction de pression s'accompagne souvent d'une baisse de température, ce qui peut augmenter les risques de formation d'hydrates plutôt que de les diminuer. [23]

### c) Utilisations d'inhibiteurs

Il s'agit de produits chimiques agissant comme des antigels (réduisant le point de formation des hydrates).

Les alcools, tels que les glycols et le méthanol, sont communément employés comme inhibiteurs thermodynamiques. Il est important de noter que le méthanol a une fonction préventive, ce qui signifie qu'il n'est efficace que s'il est injecté avant le début de la formation des hydrates. [24] [25]

#### ❖ Pourquoi la déshydratation du GPL

- Réduction de la corrosion des conduites.
- Prévention de la formation des hydrates.
- Éviter le risque de solidification dans les procédés cryogéniques.



*Figure III-2 : Accumulation des hydrates dans une conduite (source Petrobras, Brasil).*

### III.3 LES MODES DE DESHYDRATATION [18] [26]

On peut classer les méthodes de déshydratation du GPL en trois catégories :

- Déshydratation du GPL par refroidissement.
- Déshydratation du GPL par absorption.
- Déshydratation du GPL par adsorption.



### III.3.1 Déshydratation du GPL par refroidissement

#### III.3.1.1 Injection de glycol

L'utilisation de glycol liquide, l'éthylène glycol et le diéthylène glycol permet d'inhiber la formation d'hydrates lors du refroidissement. Le diéthylène glycol est préféré en raison de son faible coût et de sa moindre solubilité dans les hydrocarbures liquides. En absorbant l'eau, le glycol empêche la création des conditions nécessaires à la formation des hydrates de hydrocarbures solides.

#### III.3.1.2 Injection de méthanol

Le méthanol est couramment introduit dans un flux de gaz pour prévenir la formation d'hydrates. Cependant, des injections de méthanol de façon sporadique sont souvent employées lorsque des hydrates se forment légèrement.

### III.3.2 Déshydratation par absorption (avec un solvant physique)

Les solvants physiques sont couramment employés dans l'industrie pour déshydrater les gaz sans impliquer de réactions chimiques. Parmi les divers solvants disponibles à cette fin, les glycols se distinguent par leur efficacité. En particulier, les glycols sont préconisés pour leur capacité à absorber l'eau présente dans le GPL. Quatre types de glycols peuvent être utilisés pour déshydrater le gaz : l'éthylène glycol, le diéthylène glycol, le triéthylène glycol et le tétraéthylène glycol.

### III.3.3 Déshydratation par adsorption (sur un desséchant solide) [18]

L'adsorption est une opération physique utilisée pour séparer 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.

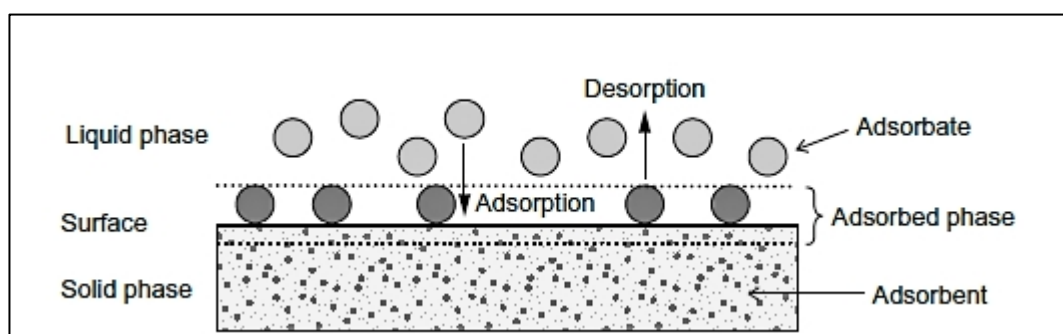
L'analyse des équilibres d'adsorption permet de déterminer le niveau maximum de séparation possible dans des conditions thermodynamiques spécifiques.

L'étude de la cinétique de l'adsorption permet de comprendre la vitesse à laquelle un système atteint son état d'équilibre. Ce processus est influencé par la diffusion des composants à séparer à travers l'adsorbant et le fluide, ainsi que par les conditions hydrodynamiques du contact. Elle permet d'évaluer l'efficacité d'un équipement.

### III.4 PHENOMENE D'ADSORPTION

#### III.4.1 Définition de l'adsorption

L'adsorption est le phénomène par lequel les molécules d'un fluide, qu'il s'agisse de gaz ou de liquide, appelé adsorbat, se fixent sur la surface d'un solide, nommé adsorbant. Cette adsorption est due aux surfaces externes et internes créées par le réseau de pores et cavités à l'intérieur du solide, de sorte que tout atome ou molécule qui s'approche de cette surface est soumise à une attraction susceptible de former une liaison entre la particule et la surface. [27]



*Figure III-3 : Processus d'adsorption. [28]*

#### III.4.2 Description du phénomène d'adsorption [29]

Peu importe le type de forces auxquels il est exposé, un atome en périphérie d'un solide se différencie d'un atome en profondeur car la somme des forces le touchant n'est pas égale à zéro.

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

Cependant, il est suffisant pour attirer les molécules de gaz ou de liquide à proximité immédiate de l'interface, entraînant ainsi la fixation des molécules à la surface. Lors de l'adsorption d'un fluide par un solide, une couche se forme à l'interface solide-fluide, où la répartition des molécules diffère de celle présente dans le fluide. Lorsqu'un adsorbant est plongé dans un fluide, la composition de ce dernier varie plus ou moins rapidement jusqu'à atteindre un équilibre. L'adsorption est un phénomène spontané toujours exothermique. En fonction des énergies impliquées, le processus d'adsorption peut être classifié comme étant de nature physique ou chimique.

### III.4.3 Types d'adsorption

#### 1- Adsorption Physique

L'adsorption physique, également appelée physisorption, est un phénomène physique impliquant des interactions faibles entre les entités moléculaires telles que les forces d'attraction de van der Waals et les forces électrostatiques de polarisation. Ce processus est réversible, peu spécifique, rapide et en général contraint par les phénomènes de diffusion.

Une estimation de la force des interactions en jeu peut être réalisée en mesurant l'énergie d'adsorption physique, laquelle varie entre 5 et 40 kJ/mole et est qualifiée de faible. Ce processus est favorisé par une diminution de la température et peut se produire en mono ou multicouches. [30]

#### 2- Adsorption Chimique

L'adsorption chimique (la chimisorption) se produit suite à la création d'une liaison chimique entre la surface de l'adsorbant et le substrat. Cette liaison peut être soit covalente soit ionique, et implique des énergies d'adsorption significativement plus élevées que celles de l'adsorption physique, atteignant environ 100 Kcal/mole. Ce phénomène se déroule à des températures élevées, est souvent irréversible et lent, et entraîne une altération des molécules adsorbées. Ces molécules ne peuvent pas se superposer sur plus d'une monocouche. [31]

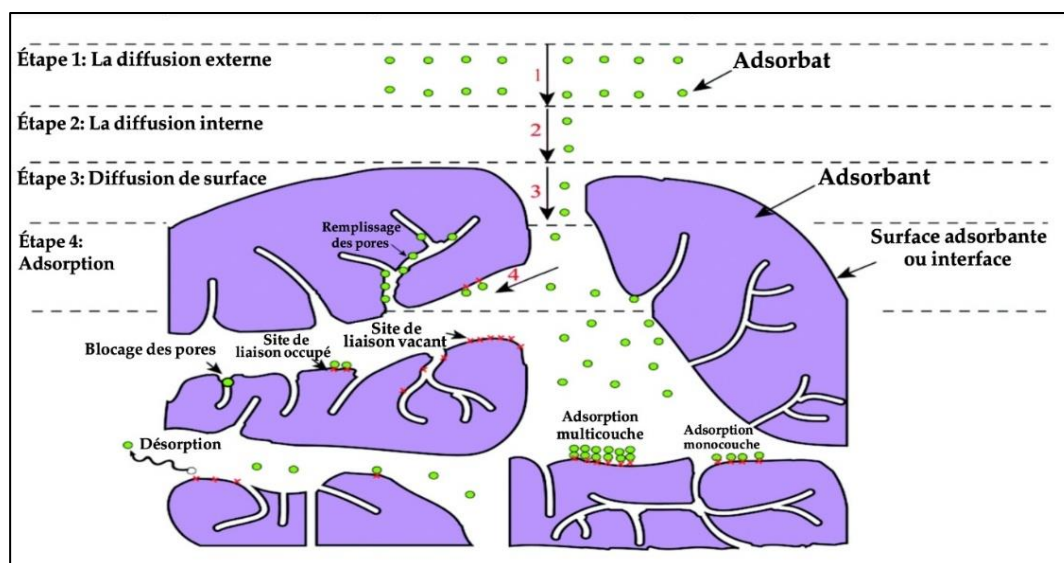
*Tableau III-1 : Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique. [32]*

Propriété	Adsorption physique	Adsorption chimique
Types de liaison	Liaison de Van Der Waals	Liaison chimique
T° du processus	Relativement basse	Plus élevée
Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide, indépendante de la température.	Très lente.
Chaleur d'adsorption	Inférieur à 10 Kcal/mole.	Supérieur à 10 Kcal/mole
Energie mise en jeu	Faible.	Elevée.
Types de formation	Formation en multicouche en monocouche.	Formation en monocouche.

### III.4.4 Mécanisme l'adsorption [33]

Pendant l'adsorption d'une substance sur une surface solide, les molécules se déplacent de la phase fluide vers le centre de l'adsorbant. Ce phénomène se déroule à l'intérieur d'une particule d'adsorbant en différentes étapes :

- 1- **Diffusion externe** : consiste en le transfert des molécules de soluté de la phase liquide externe vers la phase liquide attachée à la particule solide, à travers les processus de diffusion et de convection.
- 2- **Diffusion interne** : comprend le transfert du soluté à travers le film liquide pour atteindre la surface externe de l'adsorbant, défini par le coefficient de transfert  $K_f$ .
- 3- **Diffusion de surface** : implique la diffusion de surface, où dans certains cas, il peut également y avoir une contribution de la diffusion des molécules adsorbées le long des surfaces des pores au niveau d'un grain d'adsorbant.
- 4- **L'adsorption.**



*Figure III-4 : Diverses étapes du processus de transfert d'un soluté pendant son adsorption sur un matériau microporeux.*

### III.4.5 Facteurs influençant l'adsorption [34]

L'adsorption varie d'un composé à un autre en fonction de plusieurs facteurs, notamment :

- La température et la pression du système
- La structure chimique, les caractéristiques physiques et la configuration de la surface de l'adsorbant.
- La concentration de l'adsorbat.
- Les caractéristiques de l'adsorbat (sa masse moléculaire, sa polarité et sa pression de vapeur).

### III.4.6 Avantages et inconvénients de la déshydratation par adsorption [35]

#### ➤ Avantages

- 1- Capacité à atteindre des points de rosée très bas (inférieurs à  $-60^{\circ}\text{C}$ ).
- 2- Résistance du dessiccant aux variations modérées de température, de débit et de pression du gaz.
- 3- Facilité d'utilisation et de conception des unités.
- 4- Absence de corrosivité et de toxicité.
- 5- Faible perte de charge.

#### ➤ Inconvénients

- 1- Coût de départ élevé.
- 2- Besoins calorifiques élevés pour une régénération.
- 3- Diminution de la performance et de l'efficacité au fil du temps.
- 4- Augmentation de la chute de pression.

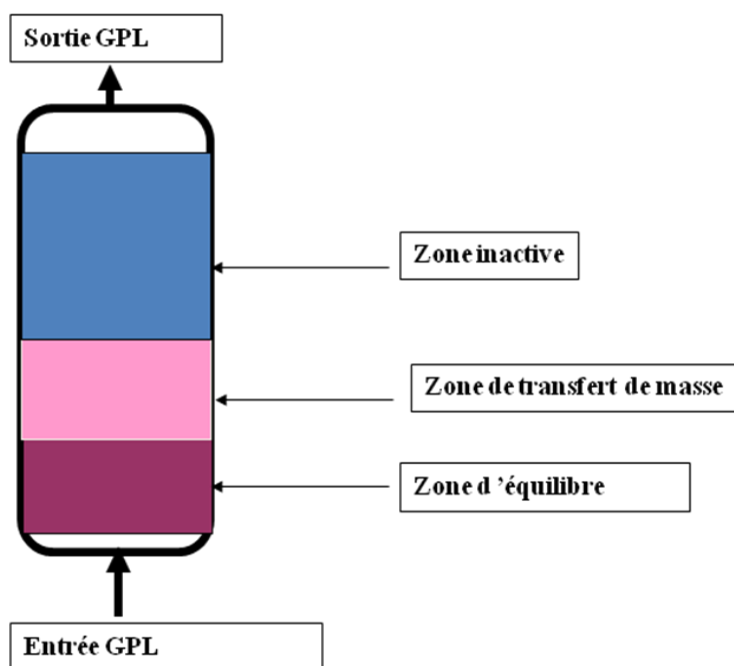
### III.4.7 Zone de transfert de masse (ZMT) [11] [18]

L'adsorption est un phénomène caractérisé par un transfert de masse où les molécules passent du fluide vecteur aux pores de l'adsorbant sur une période spécifique, qui est impactée par plusieurs facteurs tels que :

- 1- La concentration de l'adsorbat à transférer.
- 2- La présence de molécules concurrentes ou interférentes.
- 3- L'ouverture des voies de diffusion au sein des particules adsorbants (macropores) ainsi que la taille des pores actuels de l'adsorbant.

La zone de transfert de matière, qui est également appelée la ZMT, désigne la section du lit où s'effectue le passage d'un composant de la phase gazeuse à la phase solide à travers une certaine longueur, et est suivie par une zone d'équilibre.

Un tiers de la zone de saturation est généralement égal à la zone de transfert de masse, c'est pourquoi il est courant d'ajouter entre 0,3 et 0,6 mètres de desséchant au fond du lit comme mesure préventive contre la sortie du point de percée du lit.



*Figure III-5 : Emplacement de la zone ZMT.*

### III.4.8 Concept de la zone de transfert de masse

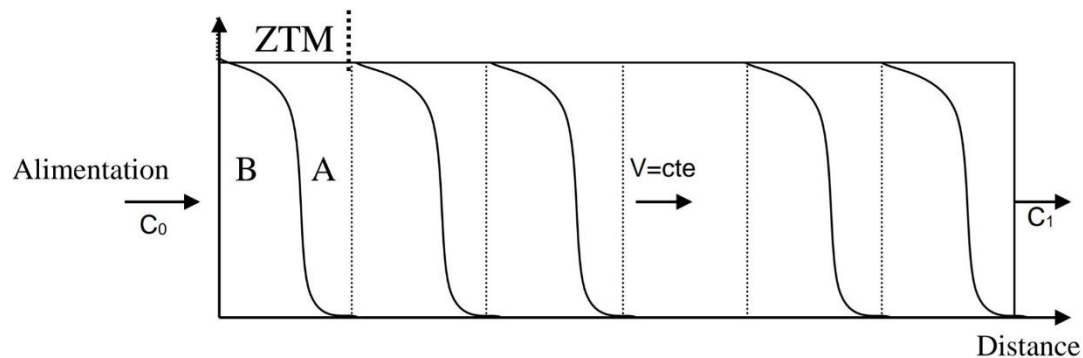
La zone de transfert de masse est caractérisée par la longueur du lit requise pour le processus d'adsorption, avec une variation de la concentration de l'adsorbat à la sortie en fonction de la concentration initiale.

L'adsorbant est saturé en amont de la zone de transfert, mais il est vierge ou régénéré en aval, prêt à être employé.

L'importance de la zone de transfert de masse est principalement influencée par :

- 1- La vitesse linéaire superficielle.
- 2- La cinétique d'adsorption de l'adsorbat.
- 3- Caractéristiques du tamis moléculaire (type, forme, granulométrie).

- 4- Les propriétés thermodynamiques du fluide.
- 5- Les concentrations d'entrées et de sortie. [11]



**Figure III-6 : Evolution de la concentration de l'adsorbat (fluide) au cours de l'adsorption.**

Pendant la période d'adsorption, Le front d'adsorption se déplace de manière constante à travers la couche d'adsorbant, de l'entrée à la sortie jusqu'à ce que l'épuration ne soit plus efficace. Il est essentiel de régénérer l'adsorbant en procédant à la désorption de l'adsorbat. La vitesse de déplacement du front d'adsorption varie en fonction du taux de chargement en adsorbat, de l'adsorbant, et du flux d'adsorbat.

Lorsqu'un effluent est traité à travers une colonne d'adsorbant, l'équilibre de la colonne est établi progressivement à mesure que le lit se sature jusqu'à la sortie de la colonne. La zone où le matériau est partiellement saturé est connue sous le nom de zone de transfert de matière (ZTM).

Ainsi, trois zones distinctes peuvent être identifiées :

- La zone d'équilibre (ZE) : partie saturée.
- La zone de transfert de matière (ZTM) : partie non saturée.
- La zone active (ZA) : partie exempte d'eau.

Les variations de la zone de transfert de masse entraînent la saturation des couches de l'adsorbant et le déplacement de la ZMT vers la sortie de la colonne (correspondant à la concentration initiale  $C_0$ ) au fil du temps. [36]

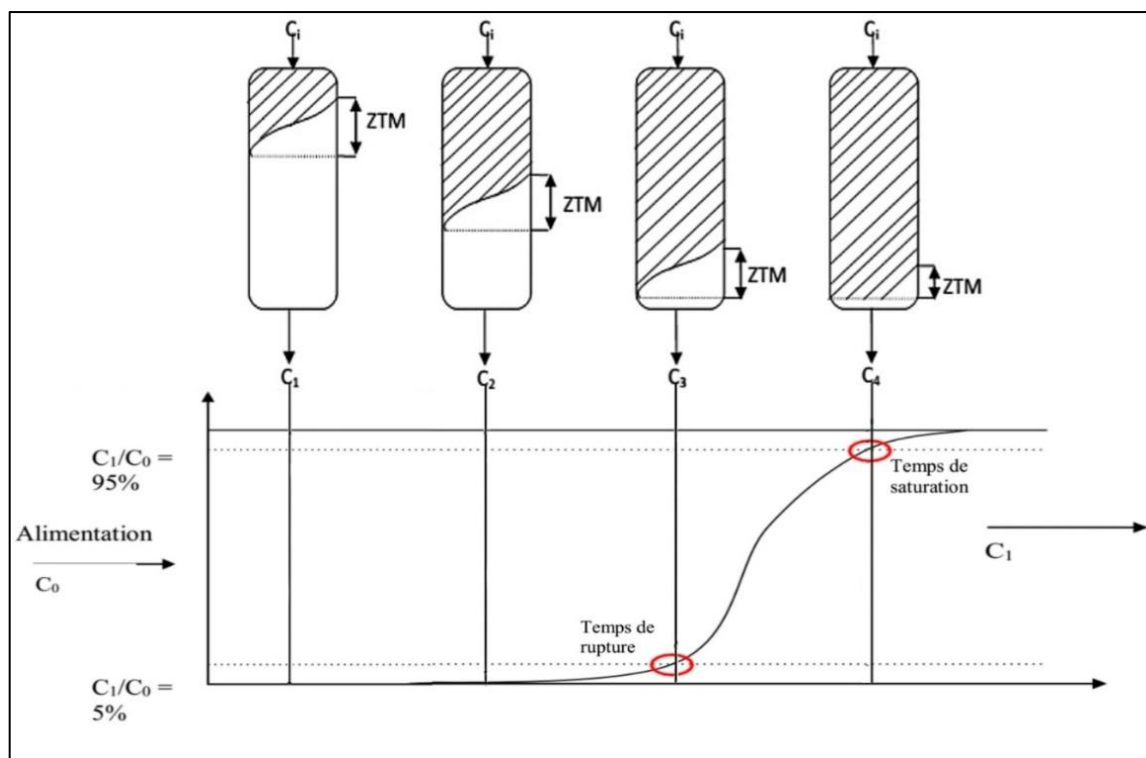


Figure III-7 : Adsorption idéale en colonne (ZTM).

En pratique, le temps du cycle d'adsorption est limité lorsque le temps de cycle est égal au temps de rupture ( $t_{\text{cycle}} = t_{\text{rupture}}$ ).

Le moment auquel l'eau se manifeste dans la charge en sortant de la section de déshydratation est appelé temps de rupture et il est déterminé lorsque le rapport  $C_1/C_0$  atteint 5%.

Au moment où la charge poursuit son chemin à travers le lit, on parvient à un point où la concentration en eau dans l'effluent est presque identique à celle de la charge ( $C_1/C_0 = 95\%$ ), définissant ainsi le temps de saturation. [36]

### III.4.9 Principaux adsorbants [18]

Il y a quatre agents desséchants importants qui sont couramment utilisés : le silicagel, l'aluminagel, l'alumine activée, le charbon actif et le tamis moléculaire. Les molécules solides sont attirées par une surface en raison d'une force de cohésion non équilibrée et d'une faible attraction pour les molécules dans un fluide, créant un effet similaire à une attraction magnétique.



De plus, il existe deux autres phénomènes liés à l'adsorption de surface. Ces forces d'adsorption tendent à se concentrer au niveau où la surface se courbe pour former un cylindre ou un pore.

Les forces de condensation commencent à se concentrer lorsque le diamètre de ce pore se rapproche de celui de la molécule à adsorber.

➤ **Silicagel**

Le silicagel se trouve couramment dans le commerce sous forme de poudre ou de granulés de diverses tailles. Cet agent, représenté par la formule  $(\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ , est amorphe et très poreux. Ses pores ont un diamètre moyen de 40 nm.

Le silicagel présente la plus grande capacité d'adsorption d'eau (40 kg  $\text{H}_2\text{O}$  pour 100 kg de silicagel) et permet d'atteindre un point de rosée de  $-60\text{ }^\circ\text{C}$  (10 ppm).

➤ **Alumine activée**

L'alumine active se présente sous la forme d'une structure amorphe, poreuse et partiellement hydratée de l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), qui présente une capacité d'adsorption moindre que le silicagel, permettant ainsi d'atteindre un point de rosée de  $-75\text{ }^\circ\text{C}$  (1 ppm).

➤ **Aluminagel**

L'Aluminagel peut abaisser la teneur en eau d'un liquide jusqu'à environ  $-60\text{ }^\circ\text{C}$  de point de rosée (10 ppm), ce qui le place, en conséquence, au même niveau de capacités de séchage remarquables que le silicagel et en dessous de l'alumine activée.

➤ **Charbon actif**

Les charbons actifs sont des adsorbants efficaces pour les hydrocarbures et les composés organiques. Principalement utilisés pour la récupération des solvants, ils peuvent être fabriqués à partir de diverses matières premières telles que les coquilles de noix et le charbon. Leur traitement se fait thermiquement en l'absence d'air, et ils existent sous forme de granules. Pour les régénérer, il est recommandé de ne pas dépasser une température de  $150\text{ }^\circ\text{C}$ .

➤ **Tamis moléculaire**

Les tamis moléculaires sont des aluminosilicates cristallins qui se disposent de manière à former une structure poreuse comprenant des pores de dimensions bien définies, permettant à un tamis moléculaire d'adsorber environ 10 % de son poids en eau et peut être régénéré en le traitant avec du gaz sec à 280 °C.

*Tableau III-2 : Les principales caractéristiques physiques des adsorbants. [22]*

<b>Adsorbant</b>	<b>Surface spécifique (m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Taille des pores (nm)</b>	<b>Porosité interne</b>	<b>Masse volumique apparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Charbon actif</b>	400 à 2000	1.0 à 4.0	0.4 à 0.8	300 à 600
<b>Tamis moléculaires carboné</b>	300 à 600	0.3 à 0.8	0.35 à 0.5	500 à 700
<b>Gel de silice</b>	600 à 800	2.0 à 5.0	0.4 à 0.5	700 à 800
<b>Alumine activée</b>	200 à 400	1.0 à 6.0	0.3 à 0.6	800 à 950
<b>Adsorbant à base de polymère</b>	100 à 700	4.0 à 20	0.4 à 0.6	400 à 700
<b>Zéolite</b>	500 à 800	0.3 à 0.8	0.3 à 0.4	600 à 750

#### III.4.10 Caractéristiques des adsorbants [37]

Un bon adsorbant doit posséder les caractéristiques suivantes :

- 1- Capacité d'adsorption élevée.
- 2- Capacité à régénérer l'adsorbant grâce à une désorption.
- 3- Maintien constant des performances dans le temps.
- 4- Bonnes propriétés mécaniques pour résister à l'écrasement.
- 5- Inertie chimique.
- 6- Aucun effet de dilatation avec la variation de température.
- 7- Cinétique d'adsorption rapide.
- 8- Densité élevée pour occuper un faible volume dans la colonne.

❖ **L'agent desséchant utilisé dans le complexe GP1/Z est un tamis moléculaire.**

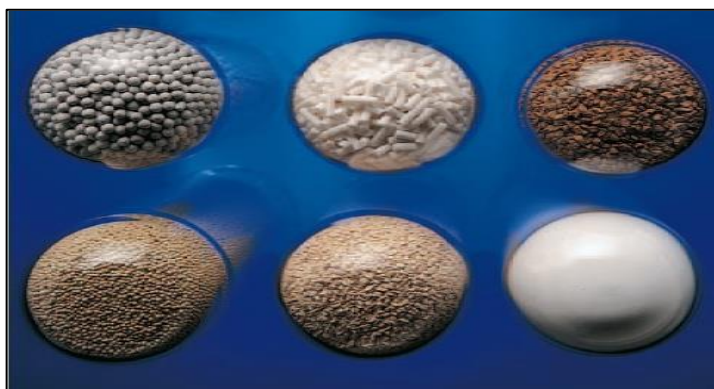
### III.5 TAMIS MOLECULAIRES

#### III.5.1 Définition du tamis moléculaire [37] [38]

Le tamis moléculaire se définit comme un matériau solide et poreux qui a la particularité de fonctionner comme un filtre au niveau moléculaire. Il s'agit d'un adsorbant possédant la capacité de piéger des molécules spécifiques à l'intérieur de ses pores.

Les tamis moléculaires sont des matériaux synthétiques de zéolite, possèdent des pores de dimension et de structure précises et uniformes.

Les zéolites sont des composés aluminosilicates métalliques hydratés caractérisés par des structures cristallines bien définies, qui nécessitent une température très élevée pour leur régénération.



*Figure III-8 : Différentes formes de tamis moléculaires.*

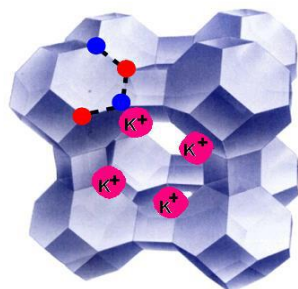
#### III.5.2 Description des tamis moléculaires [37] [39]

Des réseaux cristallins tridimensionnels de groupements silicate et aluminate entourent des cavités où sont maintenus de façon lâche des ions métalliques et des molécules d'eau. Ces pores, également désignées sous le terme de "cages", manifestent une forte attraction pour réadsorber l'eau et d'autres molécules polaires.

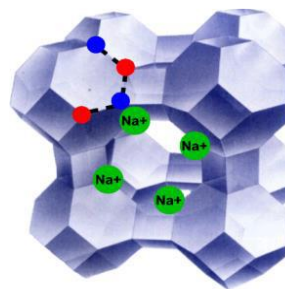
Avec l'aide de puissantes forces ioniques générées par des cations tels que le sodium, le calcium et le potassium, ainsi que grâce à leur très grande surface interne d'environ  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ , les tamis moléculaires ont la capacité d'adsorber une grande quantité d'eau ou d'autres liquides. En présence d'un composé polaire, ceux-ci peuvent être adsorbés de manière efficace même à des concentrations très faibles, permettant ainsi l'élimination d'impuretés gazeuses ou liquides à des niveaux très bas (ppm ou moins).

Il y a quatre types principaux de tamis moléculaires : 3A, 4A, 5A et 13X, chacun ayant un type déterminé par sa formule chimique qui définit la taille des pores. Les tamis moléculaires adsorbent des molécules de gaz ou de liquide plus petites que leurs pores tout en excluant celles qui sont plus grandes.

Pour les rendre plus adaptés, il faut les mettre en forme sphérique, cylindrique ou extrudée.



*Tamis moléculaire 3A*

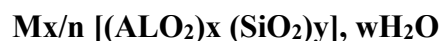


*Tamis moléculaire 4A*

**Figure III-9 : Tamis moléculaire 3A et 4A.**

### III.5.3 Formule du tamis moléculaire [40]

Les tamis moléculaires sont des zéolites cristallines qui possèdent une formule chimique fondamentale :



D'où :

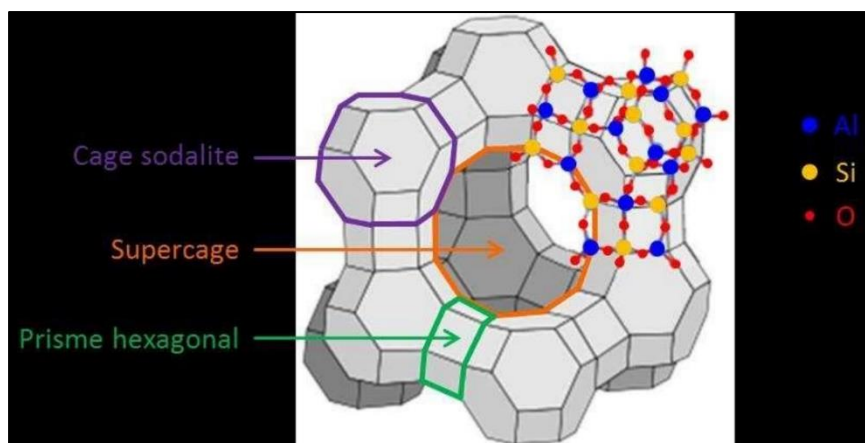
**n** : Représente la valence du cation M.

**x et y** : Étant des nombres entiers avec  $y/x \geq 1$ .

**w** : Le nombre de molécules d'eau par maille.

Le réseau cristallin est formé par l'agencement tridimensionnel de tétraèdres  $[SiO_4]$  et  $[AlO_4]$  reliés par leurs sommets.

Ces tétraèdres sont composés de quatre atomes d'oxygène situés aux sommets, entourant un atome de silicium ou d'aluminium placé au centre (voir Figure III-10).



*Figure III-10 : Structure de Zéolithes.*

Les tamis moléculaires sont des matières cristallisées présentant des pores d'une taille précisément définie et uniforme dans toute leur structure. En raison de cette uniformité, l'adsorption ne se produit que lorsque les molécules à adsorber sont assez petites et présentent une forme qui leur permet de pénétrer dans les pores, d'où l'appellation de tamis moléculaire.

#### III.5.4 Types des tamis moléculaires [35]

Il existe deux types :

##### **Type A :**

Ce tamis moléculaire particulier présente une structure cristalline cubique avec des pores ayant un diamètre variable en fonction du cation de compensation, se situant entre 3 et 5 Å. La formule chimique de ce type est  $\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot x\text{H}_2\text{O}$ , avec x désignant le nombre de molécules d'eau.

Pour obtenir les tamis moléculaires de types 3A° et 5A°, il suffit de remplacer les ions sodium par le potassium ou le calcium respectivement.

##### **Type X :**

Avec une structure cristalline de type diamant, ce tamis moléculaire possède des pores de diamètre compris entre 9 et 13 angströms. Les cations sont responsables de l'équilibrage de la charge électrique globale, et sa forme sodium est décrite par la formule  $\text{Na}_{86}[(\text{AlO}_2)_{86}(\text{SiO}_2)_{106}] \cdot x\text{H}_2\text{O}$ .

Tableau III-3 : Caractéristique générale des tamis moléculaire. [40]

Type de base	Diamètre minimale des pores (Å)	Forme commune	Capacité d'adsorption H <sub>2</sub> O, %masse	Molécule adsorbées	Application
<b>3A</b>	3	Poudre	23	Molécules avec un diamètre effectif <3 angströms, y compris H <sub>2</sub> O et NH <sub>3</sub> .	-Séchage des gaz craqués (séchage d'oléfines). -Séchage des liquides organiques.
		1/16 in bâtonné	20		
		1/8 in bâtonné	20		
		8x12 granulé	20		
		4x8 granulé	20		
<b>4A</b>	4	Poudre	28,5	Molécules avec un diamètre effectif <4 angströms y compris éthanol, H <sub>2</sub> S, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , et C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> .	-Séchage de l'hydrogène. -Séchage de gaz d'hydrocraquage. -Séchage d'air à basse pression. -Séchage de gaz naturel -Elimination de H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> du gaz naturel -Séchage des liquides organiques.
		1/16 in bâtonné	22		
		1/8 in bâtonné	22		
		8x12 granulé	22		
		4x8 granulé	22		
		14x30 Mesh	22		
<b>5A</b>	5	Poudre	28	Molécules avec un diamètre effectif <5 Angströms y compris n-C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH de C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> à C <sub>22</sub> H <sub>46</sub> .	-Séparation des n-paraffines des iso-paraffines et les hydrocarbures cycliques.
		1/16 in granulé	21,5		
		1/8 in granulé	21,5		
<b>10X</b>	8	Poudre	36	Molécules avec un diamètre effectif <8 angströms, y compris les iso-paraffines et les oléfines.	-Séparation des hydrocarbures aromatiques.
		1/16 in bâtonné	28		
		1/8 in bâtonné	28		
<b>13X</b>	10	Poudre	36	Molécules avec un diamètre effectif <10 Angströms.	-Séchage et purification de l'aire (élimination simultanément de H <sub>2</sub> O et CO <sub>2</sub> ).
		1/16 in bâtonné	28,5		
		1/8 in bâtonné	28,5		
		8x12 granulé	28,5		
		4x8 granulé	28,5		

### III.5.5 Principes d'adsorption des tamis moléculaires [36]

Ils peuvent séparer les matériaux en fonction de leur taille moléculaire. Les pores des divers types de tamis moléculaires ne laissent passer que les molécules dont le diamètre est égal ou inférieur à celui spécifié. Si deux molécules sont suffisamment petites pour entrer dans les pores, le tamis moléculaire peut adsorber de manière préférentielle celle qui présente une plus grande polarité ou un degré de non saturation plus élevé. La rétention dans le cristal augmente avec l'augmentation de la polarité et du degré de non saturation de la molécule.

### III.5.6 Composition chimique de tamis moléculaires [36]

Le tableau ci-dessous présente la composition typique du tamis moléculaire UOP UI 94.

*Tableau III-4 : Composition chimique du tamis UOP UI 94.*

Composition	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>UOP UI-94 1/8 " (%mass)</b>	35 –36	46 –47	15 – 16	<1	<1	<0,5	<1	<0,5	<0,5

#### ❖ Remarque

Les tamis moléculaires employés pour le traitement du GPL au sein du GP1/Z sont les tamis UOP de type 4A-DG TRISIV 1/8". Leur formule chimique est Na<sub>12</sub>(AlO<sub>2</sub>)<sub>12</sub>(SiO<sub>2</sub>)<sub>12</sub>H<sub>2</sub>O.

### III.5.7 Application

Le TYPE A4-DG a été spécifiquement développé pour le séchage des hydrocarbures saturés, sa capacité dynamique exceptionnelle et sa faible perte de charge en font un choix optimal pour le séchage du gaz naturel et des GPL lorsque des spécifications de séchage très strictes sont nécessaires.



*Figure III-11 : Tamis moléculaires utilisés au niveau du complexe GPI/Z*

### III.5.8 Avantages des tamis moléculaires [41]

- 1- Maintenir la performance et l'efficacité plus longtemps.
- 2- La perte d'efficacité de l'adsorption est moins marquée à mesure que la température augmente.
- 3- Une grande capacité d'adsorption à des concentrations faibles d'adsorbat.
- 4- Les tamis sont préférés pour la déshydratation des liquides. De plus, les tamis moléculaires offrent l'avantage de pouvoir être régénérés et réutilisés, ce qui les rend appropriés pour les installations en continu.



### III.6 EFFET DES VARIABLES DE CONCEPTION DU LIT [11] [42]

L'adsorption est un processus cinétique dans lequel la zone de transfert de masse est définie comme la longueur du lit nécessaire pour que le phénomène d'adsorption se produise, Cela correspond à la distance que doit parcourir une unité de fluide pour que sa concentration initiale en eau diminue pratiquement à zéro.

Cette longueur dépend de divers facteurs :

#### III.6.1 Vitesse et diamètre du lit

Habituellement, il est plus efficace d'utiliser des lits longs et de petits diamètres plutôt que des lits courts de grands diamètres pour le séchage de l'air sur tamis moléculaire. Le tableau ci-dessous présente trois configurations de lit pour cette application. Même si tous sont fonctionnels, il est important de noter que les lits de petit diamètre offrent une efficacité supérieure.

*Tableau III-5 : Vitesse et diamètre du lit.*

Tamis moléculaire Lb	Capacité utile Adsorp d'eau %	Diamètres du lit ft	Haut du lit ft	Chute de P° PSI
8900	10	4.5	12.1	4.3
9610	9.3	6	7.4	0.9
10200	8.7	7	5.8	0.4

#### III.6.2 Teneur en adsorbat de l'effluent

La capacité effective du lit adsorbant varie également en fonction de la quantité d'adsorbat souhaitée dans l'effluent. Lorsque l'objectif est de diminuer la teneur en effluent, la longueur de la zone de transfert de masse augmente. En conséquence, une faible concentration en adsorbat conduit à une capacité d'adsorption réduite.

#### III.6.3 Charge d'adsorbat

L'adsorbat initial dans le lit influence la capacité dynamique du processus d'adsorption ; une charge d'adsorbat résiduel plus élevée entraîne une capacité réduite.

### III.6.4 Phase liquide ou gazeuse

Les agents adsorbants agissent à ces phases, ce qui est crucial pour déterminer la longueur de la zone de transfert de masse. Le taux d'adsorption dans une phase liquide est généralement dix fois plus faible, ce qui signifie que les vitesses superficielles du fluide doivent être maintenues bas pour garantir de longueur de colonnes et de zones de transfert raisonnables.

### III.6.5 Dimensions des particules

Les petites parties sont caractérisées par un taux d'adsorption supérieur à celui des particules de plus grande taille, les dimensions des particules ont un impact sur la longueur de la zone de transfert de masse ainsi que sur la distribution des fluides d'adsorption et de régénération.

## III.7 EFFET DES VARIABLES DE PROCEDE [29] [36]

### III.7.1 Température

La diminution de la capacité à l'équilibre des tamis moléculaires est proportionnelle à l'augmentation de la température. L'adsorption est accompagnée d'une libération de chaleur (chaleur d'adsorption), ce qui provoque une hausse de température. En raison de cet effet thermique, la capacité effective de l'adsorbant est réduite.

### III.7.2 Pression

L'adsorption devient plus efficace à mesure que la pression augmente, à température constante. Tandis que la teneur en eau de saturation du fluide d'entrée diminue en fonction de la pression accrue, Ainsi, si les déshydrateurs fonctionnent à une pression bien inférieure à celle nominale, le desséchant devra travailler davantage pour évacuer l'excès d'eau et garantir le niveau de point de rosée désiré de l'effluent.

### III.7.3 Concentration

La capacité des tamis moléculaires pour adsorber un produit s'améliore avec une concentration plus élevée de ce produit. Les tamis moléculaires offrent un avantage majeur en permettant une adsorption élevée même avec de faibles concentrations du produit à adsorber.

### III.7.4 Direction de l'écoulement

Le sens de l'écoulement de charge pendant le processus de séchage est généralement dirigé vers le bas pour le gaz, permettant ainsi d'atteindre des vitesses plus élevées sans risquer d'endommager le matériau par fluidisation. En règle générale, le flux de gaz de chauffage se déplace en sens contraire à celui du courant d'adsorption, favorisant ainsi une réactivation optimale du lit de séchage. Lorsque le flux de gaz de chauffage est en co-courant avec le courant d'adsorption, l'eau et les autres contaminants doivent traverser toute la longueur du lit, entraînant une éventuelle contamination du matériau supplémentaire et un temps de régénération prolongé.

### III.7.5 Type et dimension du tamis

L'utilisation du tamis moléculaire de type 4A est primordiale dans le processus de déshydratation du GPL. Ce dessicant adsorbe les molécules de diamètre inférieur à 4A, telles que le H<sub>2</sub>S, le CO<sub>2</sub>, l'éthane et les hydrocarbures les plus légers, tout en rejetant celles de diamètre supérieur à 4A. Les installations de GPL choisissent d'utiliser des granulés de 1.588 mm plutôt que de 3.175 mm, car ces derniers offrent une plus grande surface par rapport à leur volume pour assurer un transfert de masse efficace.

## III.8 REGENERATION DES TAMIS MOLECULAIRES [42]

Le tamis moléculaire UOP type 4A-DG peut être restauré en effectuant une purge à haute température. L'efficacité de cette opération dépend de paramètres tels que la température, la pression et la teneur en humidité du gaz utilisé pour la purge.

À l'équilibre, la saturation du tamis moléculaire se manifeste par l'arrêt de l'adsorption, le tamis ne pouvant plus adsorber de molécules supplémentaires.

Pour éliminer les produits adsorbés, trois méthodes sont couramment utilisées : en augmentant la température, en réduisant la pression partielle de l'adsorbat, ou en combinant ces deux approches.

### III.8.1 Désorption par augmentation de la température

Habituellement, elle est réalisée en balayant le lit avec un gaz préalablement chauffé. Le plus souvent, l'effet de la hausse de température est renforcé par l'effet de la réduction de la pression partielle. La température de régénération thermique est déterminée par les performances requises, la nature de l'adsorbat, la teneur en eau du gaz de purge, et se situe entre 200 et 300°C.

Afin d'assurer une régénération appropriée, il est indispensable de fournir une quantité de chaleur équivalente à la somme des quantités de chaleur liées à :

- Le chauffage du lit d'adsorbant.
- Le chauffage de l'adsorbent.
- Le chauffage et la désorption de la masse d'adsorbat retenue dans le lit.
- Les pertes de chaleur à travers les parois de l'adsorbent.

Une fois le chauffage terminé, le lit subit une phase de refroidissement pour revenir à sa température d'adsorption. [42]

### III.8.2 Désorption par diminution de la pression partielle

Basée sur la variation de pression, la régénération repose sur la diminution de la capacité d'adsorption,

Causée par la diminution de la pression partielle de l'adsorbat. Ce dernier est éliminé par un courant de gaz de purge à basse pression, ayant une température identique à celle du gaz d'adsorption. [42]

### III.8.3 Désorption par déplacement par un composé adsorbable

La facilitation de la régénération est attribuée non seulement à la diminution de la pression partielle (ou de la concentration) de l'adsorbat, mais également à l'effet de l'adsorption compétitive de l'agent de déplacement. Ce dernier est déplacé par les espèces adsorbées lors du processus d'adsorption.

Cette technique de régénération est appliquée lorsque l'adsorbat présente une forte affinité pour l'adsorbant ou une stabilité thermique limitée.



## **CHAPITRE IV**

**PRESENTATION DU PROBLEME**

**ET LA METHODE DE CALCUL**

## IV.1 Problématique

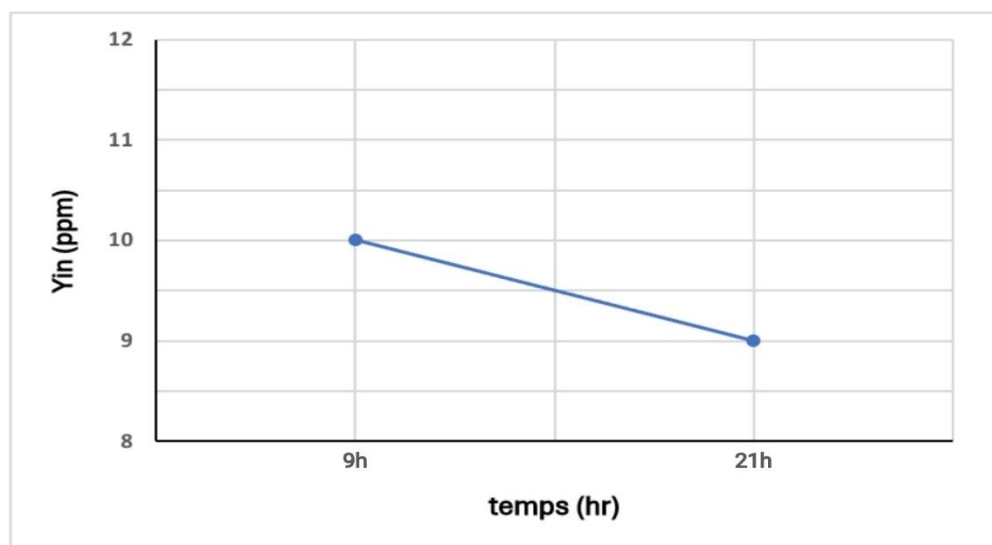
La diminution de la teneur en eau du GPL impacte les paramètres opérationnels de la section de déshydratation de la charge, un aspect que nous examinons dans notre étude.

Le design initial de la déshydratation de la charge du complexe GP1/Z a été basé sur une teneur en eau dissoute dans le GPL de 100 ppm. Cependant, il est observé que cette teneur n'est pas atteinte actuellement en raison du prétraitement de la charge provenant du sud.

Normalement, une concentration en eau de 100 ppm requiert 36 heures d'adsorption et 19 heures de régénération. Cependant, les niveaux actuels d'eau dans le GPL sont souvent bien inférieurs, parfois même jusqu'à moins de 15 ppm.

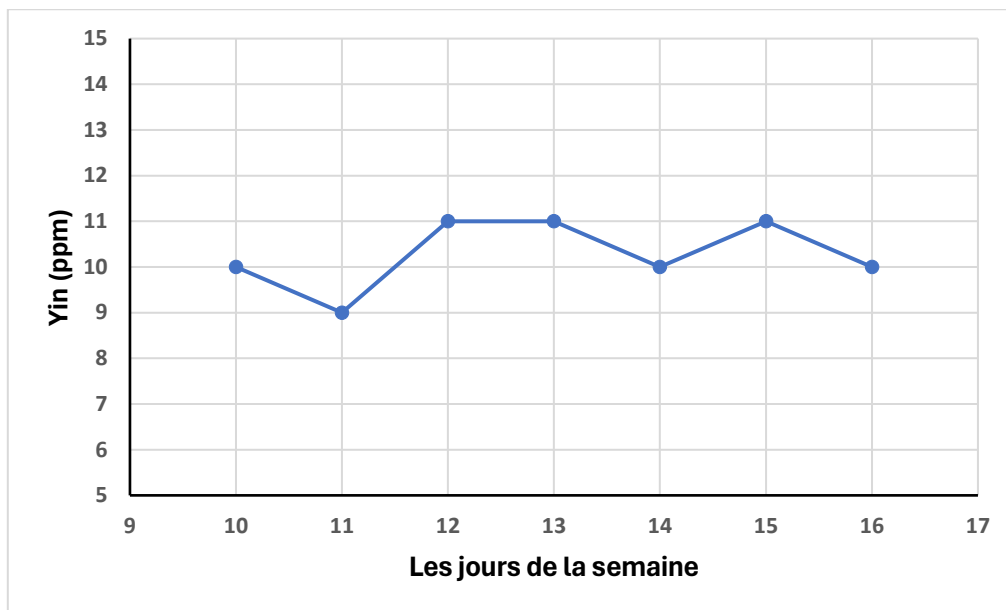
Cette situation a été confirmée par un suivi sur trois mois durant trois années différentes (Novembre 2022, Avril 2023, Février 2024). Le problème persiste de manière chronique, entraînant des pertes économiques significatives, car le lit d'adsorption fonctionne bien en dessous de sa capacité optimale.

Au cours de notre stage, nous avons analysé la teneur en eau de la charge GPL à l'entrée du sécheur sur différentes périodes allant de 24 heures à un mois (Le 1<sup>er</sup> février 2024). Après une période de 24 heures et d'après la figure (IV-1), nous avons observé que la teneur en eau n'a pas dépassé 10 ppm, et cette valeur est bien inférieure à la teneur en eau du design initial (100 ppm).



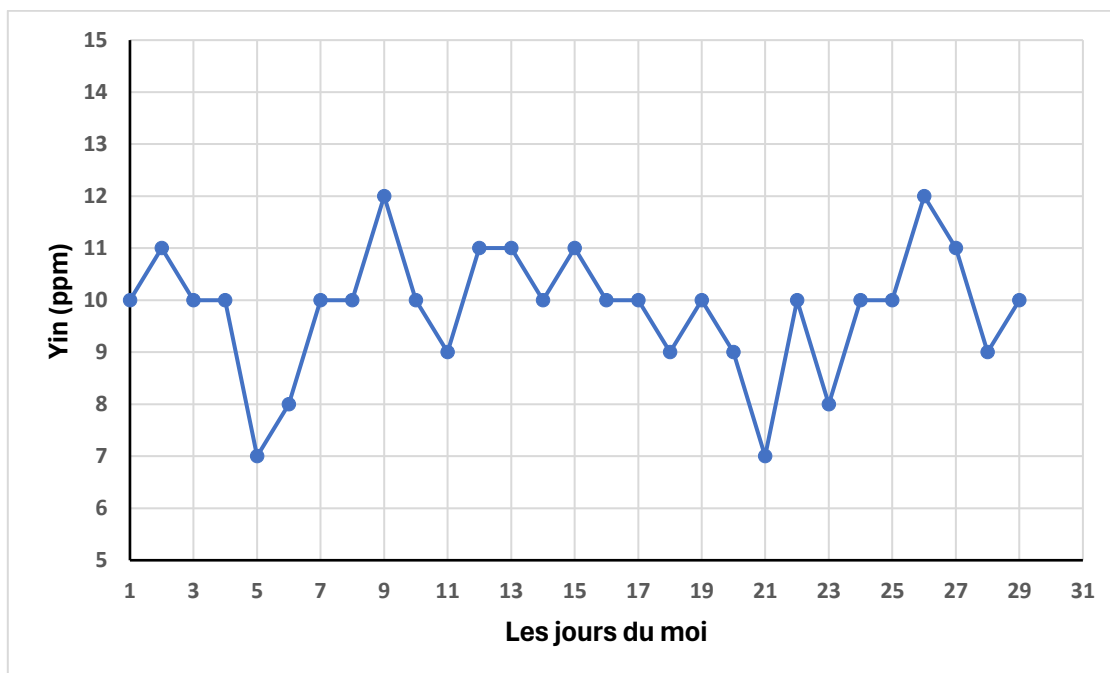
*Figure IV-1 : la variation de la teneur en eau dans la charge durant 24 heures (Le 1er février 2024).*

En prolongeant l’analyse à une semaine (du 10 au 16 février 2024), nous avons constaté que la teneur en eau n’a pas dépassé 11 ppm selon la figure (IV-2).



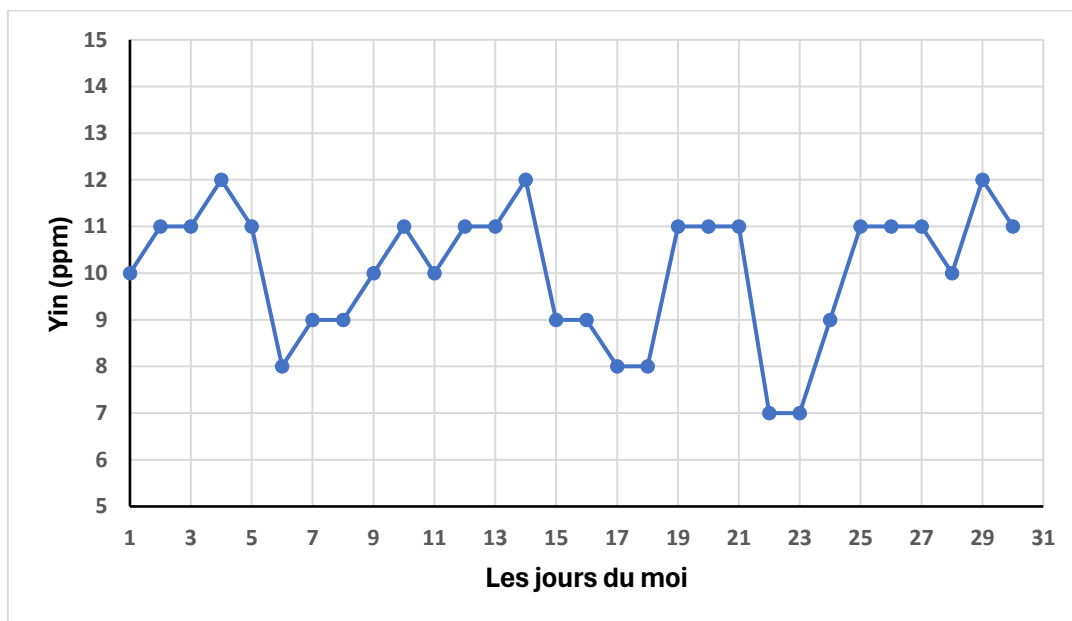
*Figure IV-2 : la variation de la teneur en eau dans la charge durant une semaine (Du 10 au 16 février 2024).*

D’après notre analyse sur une période d’un mois (février 2024) et en se basant sur la figure (IV-3), il est clair que la teneur en eau de la charge reste en dessous de 12 ppm.

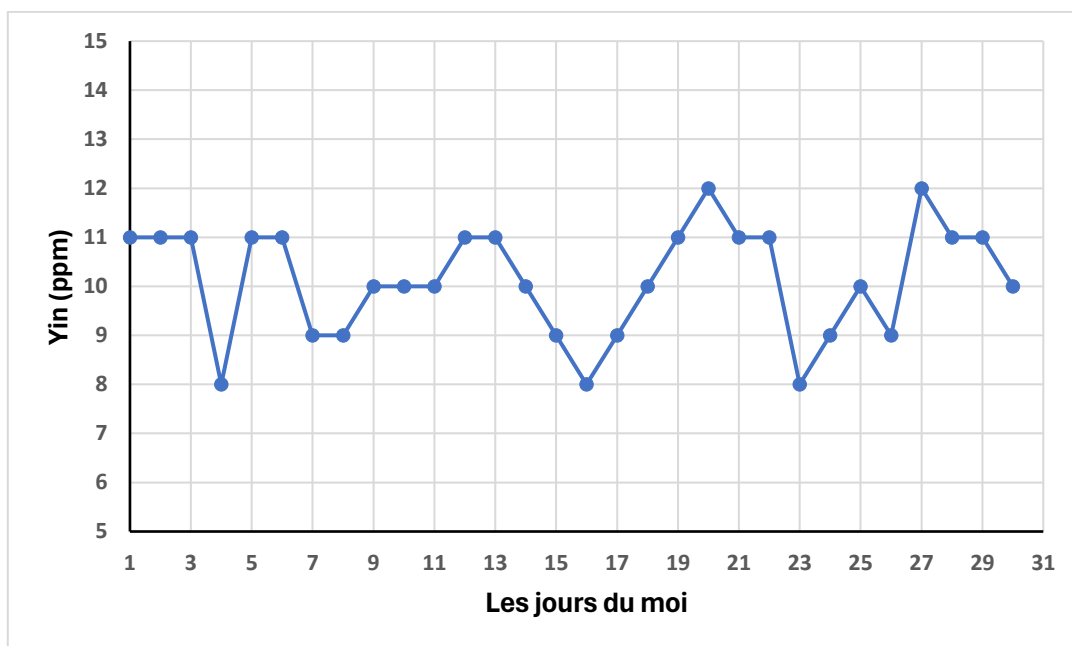


*Figure IV-3 : la variation de la teneur en eau dans la charge durant un mois.*

Le suivi de la teneur en eau dans la charge pendant une période de (Novembre 2022, Avril 2023) indique que le sécheur fonctionne en dessous de sa capacité optimale, entraînant des pertes significatives.



*Figure IV-4 : la variation de la teneur en eau dans la charge durant un mois (Novembre 2022).*



*Figure IV-5 : la variation de la teneur en eau dans la charge durant un mois.*



Afin d'optimiser le fonctionnement de la section de déshydratation de charge, notre objectif est de réaliser une étude en prenant en compte les diverses concentrations en eau.

Pour ce faire, nous avons commencé à explorer des solutions possibles pour résoudre notre problème. Cette exploration 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 fondant sur le dimensionnement du déshydrateur de charge ainsi que sur le calcul du bilan massique et énergétique,

On détermine 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.

## IV.2 Méthode de calcul

L'objectif de cette section est de déterminer et de fixer les paramètres optimaux pour le fonctionnement de la section de déshydratation de la charge. Cela implique le calcul du temps d'adsorption nécessaire pour atteindre le point de saturation de l'adsorbeur en fonction de la teneur en eau de la charge, tout en cherchant à optimiser les paramètres du cycle de chauffage.

Pour ce faire, cette partie comprend :

- Un bilan thermique : effectué dans deux cas, l'un avec une teneur en eau de la charge de 100 ppm (design) et l'autre avec une teneur de 15 ppm (état actuel).
- Un bilan de matière : incluant le dimensionnement du sécheur et le bilan matière de régénération.

Nos travaux se concentrent principalement sur les bilans thermiques et de matière, en particulier pour évaluer la quantité de chaleur et le débit de gaz naturel nécessaires à la régénération du sécheur. Avant toute application, nous validons la méthode adoptée dans un sous-titre intitulé "Validation de méthode", où les calculs sont effectués pour un déshydrateur de charge fonctionnant selon le design.

### IV.3 Constitution d'un déshydrateur de charge [7] [9]

Le principal élément d'une colonne de déshydratation est le tamis moléculaire, qui joue le rôle d'agent adsorbant. Pour soutenir le tamis moléculaire, on utilise une couche de billes en céramique d'une épaisseur de 150 mm, avec une couche similaire placée au-dessus.

Généralement, des treillis métalliques, des grilles et des tiges servent de support pour le tamis moléculaire.

Les autres composants du déshydrateur assurent l'étanchéité, la réduction de la vitesse du fluide d'entrée, ou sa distribution sur toute la surface du lit.

- La fiche technique du déshydrateur est illustrée sur le Tableau IV-1 : [7] [9]

*Tableau IV-1 : Fiche technique du déshydrateur.*

<b>Données</b>	
<b>Nombre de sècheurs</b>	12 pour la phase 1 4 pour la phase 2 9 pour la phase 3
<b>Diamètre du lit <math>D_L</math></b>	2,1 m
<b>Hauteur du lit <math>H_t</math></b>	1,8 m
<b>Temps de cycle d'adsorption</b>	36 h
<b>Temps de régénération</b>	19 h
<b>Temps de réchauffage</b>	11 h
<b>Temps de refroidissement</b>	5 h
<b>Type du tamis moléculaire</b>	4A-DG TRISIV 1/8
<b>Diamètre des particules</b>	3,2 mm
<b>Masse volumique du tamis</b>	640 kg/m <sup>3</sup>
<b>Diamètre nominal des pores</b>	4°A
<b>Chaleur de désorption de l'eau</b>	1800 BTU / Lb d'eau
<b>Capacité calorifique</b>	0.22 k cal / kg °C
<b>Masse volumique du GPL</b>	530 kg/m <sup>3</sup>
<b>Poids moléculaire du GPL</b>	49,20 kg/kmole

<b>Conditions Opératoires</b>	
Température du GPL	25 °C
Pression du GPL	30,7 kg/cm <sup>2</sup>
Débit de charge	245 m <sup>3</sup> /h
Teneur en eau	100 ppm
Températures du gaz de régénération pour le réchauffage	T <sub>E</sub> = 280 °C T <sub>S</sub> = 227 °C
Températures du gaz de régénération pour le refroidissement.	T <sub>E</sub> = 12,7 °C T <sub>S</sub> = 227 °C
Pression du GN	4,5 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Propriétés du GN</b>	
Débit du gaz d'alimentation	2000 Nm <sup>3</sup> /h pour le réchauffage. 760 Nm <sup>3</sup> /h pour le refroidissement.
Masse volumique du GN	0,83 kg /Nm <sup>3</sup>
Poids moléculaire du GN	18,70 kg/kmole
Densité relative du GN	0,64
Viscosité du GN	0,059 kg/m.h pour le gaz chaud 0,045 kg/m.h pour le gaz froid
Facteur de compressibilité (Dans les conditions normales)	1

#### IV.4 Théorie de calcul [43]

##### IV.4.1 Bilan énergétique

###### IV.4.1.1 Calcul de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération

La quantité totale de chaleur requise pour la régénération est donnée par la formule suivante :

$$Q_{total} = Q_{tamis} + Q_{acier} + Q_{des} + Q_{pertes} \quad (1)$$

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

$Q_{\text{acier}}$  : La chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier de la température d'adsorption à la température de désorption (Kj).

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

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

#### IV.4.1.2 Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption de l'eau $Q_{\text{des}}$

Elle est donnée par la formule suivante :

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

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

#### IV.4.1.3 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis $Q_{\text{tamis}}$

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

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

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

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

$T_{\text{ads}}$  : La température d'adsorption (°C).

#### IV.4.1.4 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis $Q_{\text{acier}}$

$$Q_{\text{acier}} = m_c * c_{pt} * (T - T_{\text{ads}}) \quad (4)$$

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

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

**IV.4.1.5 Calcul des pertes de chaleur  $Q_{\text{perte}}$** 

$$Q_{\text{pertes}} = 0.1 * (Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{des}} + Q_{\text{acier}}) \quad (5)$$

Afin de déterminer la quantité totale de chaleur ( $Q_{\text{totale}}$ ), il est essentiel de connaître la température du lit à la fin du processus de chauffage « T ».

**IV.4.1.6 Calcul de la température du lit T [43]**

La température du lit est calculée à partir de la relation suivante :

$$T = T_S - \frac{(T_e - T_s)}{2} \quad (6)$$

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

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

**IV.4.1.7 Calcul de la chaleur fournie par le four  $H_f$  [44]**

On peut l'obtenir par la relation suivante :

$$H_f = \frac{Q_{\text{totale}}}{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (7)$$

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

**IV.4.1.8 Calcul du temps de réchauffage du tamis  $t_r$  [43]**

$$t_r = \frac{H_f}{\Delta H_{(T_e/T_{\text{ads}})}} \quad (8)$$

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

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

$t_r$  : Le temps de chauffage (h).

#### IV.4.1.9 Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle $H_f/cycle$

À partir de l'équation :

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

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

$$H_f/cycle = \frac{H_f * t_r}{t_{ads}} \quad (9)$$

$H_f/cycle$  : la chaleur fournie par le four par cycle (kj/h).

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

#### IV.4.1.10 Calcul du temps de refroidissement du tamis $t_{ref}$

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

#### IV.4.1.11 Calcul de la chaleur soutirée au système $Q_{ref}$

$$Q_{ref} = \frac{Q_{tamis} + Q_{acier}}{t_{ref}} \quad (11)$$

### IV.4.2 Bilan de matière de la régénération [43]

#### IV.4.2.1 Calcul du débit du gaz de refroidissement

Le débit du gaz de refroidissement est donné par :

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

$\Delta H(T_s - T_e)$  : La différence de l'enthalpie du gaz (kj / Nm<sup>3</sup>) de refroidissement.

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

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

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

Après avoir effectué les bilans thermiques et de matière, il est essentiel de vérifier que le débit calculé ne générera pas une perte de charge excessive et que l'écoulement est bien turbulent.

#### IV.4.2.2 Calcul de la chute de pression [43]

On peut la calculer en utilisant la formule suivante :

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

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

$\mu$  : la viscosité du GN (Cp).

$U$  : la vitesse superficielle (m/min).

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

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

A = 0.0561, B = 0.0000889

#### IV.4.2.3 Calcul du nombre de Reynolds :

La formule suivante permet de calculer le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{G * D_P}{\mu} \quad (14)$$

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both ending in small circular curls.

**CHAPITRE V**  
**VALIDITE DE LA METHODE**



## V.1 Introduction

Avant de procéder à nos calculs, nous devons valider la méthode utilisée. Pour ce faire, nous réexaminerons le dimensionnement d'un sécheur dans la section de déshydratation de la charge pour un taux de traitement de 100%.

Nous nous concentrerons principalement sur le calcul de la quantité de chaleur nécessaire pour la régénération et sur le débit approprié.

La composition de la charge du GPL est représentée sur le tableau V-1 : [17]

*Tableau V-1 : Composition de la charge du GPL.*

COMPOSANT	Mi g/mole	Yi (% molaire)	Yi * Mi
C1	16,043	0, 24	0,039
C2	30,070	1, 92	0,577
C3	44,097	59, 37	26,180
i-C4	58,123	13, 68	7,951
n-C4	58,123	24, 54	14,263
i-C5	72,150	0, 20	0,144
n-C5	72,150	0, 05	0,036

**Remarque :** Le propane et le butane constituent la majorité dans la composition du GPL (propane 59,37 %, butane 38,22 %).

## V.2 Calcul du poids moléculaire du GPL :

On peut le calculer en utilisant la formule ci-dessous :

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

$$M_{GPL} = 49.20 \text{ Kg /Kmole}$$

- Solubilité de l'eau dans le GPL à T=25°C =380 ppm/mole (voir annexe 2)
- Teneur en eau à l'entrée du déshydrateur :  $X_E= 100$  ppm.
- Teneur en eau à la sortie du déshydrateur :  $X_s= 5$  ppm.
- Masse volumique du GPL :  $\rho_{GPL}=530$  Kg / m<sup>3</sup>.

### V.3 Dimensionnement d'un déshydrateur [43]

#### V.3.1 Calcul de la quantité d'eau adsorbée

##### V.3.1.1 Diamètre minimum du lit

En se basant sur cette formule, on peut trouver le diamètre minimum :

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

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

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

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

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

On calcule la vitesse massique de l'écoulement pour les tamis moléculaires à l'aide de la formule suivante :

$$G = 3600 * \sqrt{C * \rho_{\text{tamis}} * \rho_{GPL} * D_p} \quad (16)$$

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

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

$C$  : Constante relative aux tamis moléculaire ( $C = g * 0,03291925$ ).

$$(C = 9,81 * 0,03291925 = 0.32 \text{ m} / \text{sec}^2).$$

#### Application Numérique :

$$D_p = 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ m} .$$

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

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

$$g = 9,81 \text{ m / sec}^2.$$

$$C = 0.32.$$

$$G = 3600 * \sqrt{0.32 * 641 * 530 * 3.2 \times 10^{-3}}$$

$$G = 67145,89 \text{ kg/m}^2.\text{h}$$

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

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 * 530 * 245}{3,14 * 67145,89}}$$

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

### V.3.1.2 Hauteur totale du lit $H_t$ [43]

La formule suivante permet de calculer la hauteur totale du lit :

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

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

$H_z$  : la longueur de la zone de transfert de masse (m).

### V.3.1.3 Calcul de la vitesse actuelle d'écoulement de fluide $U_{act}$ [43]

Calculé à partir de l'équation :

$$U_{act} = \frac{Q}{S} \quad (18)$$

Avec:

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

A.N

$$S = \frac{3,14 * 1,58^2}{4}$$

$$S = 1,97 \text{ m}^2$$

$$U_{act} = \frac{245}{1.97}$$

$$U_{act} = 124,22 \text{ m/h} = 2,07 \text{ m/min}$$

### V.3.1.4 Calcul le débit d'eau $q_w$

La formule suivante peut être utilisée pour calculer le débit d'eau :

$$q_w = \frac{4 * Y_{in} * Q * \rho_{GPL}}{\pi * D_L^2} \quad (18)$$

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

$$q_w = 3,77 \text{ kg/m}^2.\text{h}$$

### V.3.1.5 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse $H_z$

$$H_z = \frac{A * q_w^{0,7895}}{U_{act}^{0,5506} * R_s^{0,2646}} \quad (20)$$

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

$q_w$  : quantité d'eau dans le gaz par unité de surface du sécheur [ $\text{Lb/h.ft}^2$ ] =  $3,77 \text{ kg/m}^2.\text{h}$   
=  $0,77 \text{ Lb/ft}^2.\text{h}$

$R_s$  : Saturation relative du gaz d'entrée en % [ $100\%$ ].

$U_{act}$  : vitesse superficielle du gaz [ $\text{ft/min}$ ] =  $2,07 \text{ m/min} = 6,79 \text{ ft/min}$ .

$$H_z = 19,08 \text{ inch} = 0.48 \text{ m}$$

**V.3.1.6 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre  $H_s$** 

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

**$H_t$**  : la hauteur totale du lit ( $H_t = 1.8$  m).

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

$$\mathbf{H_s = 1,32 m}$$

**V.3.1.7 Estimation de la capacité d'adsorption à l'équilibre [43]**

La capacité d'adsorption est de 22 kg d'eau / kg de tamis moléculaire, ce qui indique une saturation complète du tamis moléculaire. (Voir l'annexe 5).

$$X_s = (22 - X_1)$$

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

En raison de la diminution de la capacité d'adsorption causée par l'encrassement des pores, la détérioration des cristaux, l'attaque chimique, etc., il est recommandé d'ajouter une quantité de tamis pour contrebalancer l'effet du vieillissement.

En supposant une baisse de capacité d'adsorption de 5% par an et une durée de vie du tamis de trois ans, les pertes peuvent être calculées de la manière suivante :

Coefficient d'usure = 70 %.

La capacité sera finalement équivalente à :

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

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

**V.3.1.8 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 kg de dessicant (X)**

$$X = X_S * \left(1 - \frac{C*H_Z}{H_S}\right) \quad (22)$$

$$X = 11,97 \text{ kg d'eau / 100 kg de dessicant}$$

C : C'est une constante, généralement choisie comme étant 0.45 et dépend de la structure des particules du tamis moléculaire.

**V.3.1.9 Estimation de la quantité d'eau adsorbée  $M_{ads}$** 

$$M_{ads} = \frac{(H_t - (C*H_Z)) * (X_S * D_L^2 * \rho_{tamis})}{127.38} \quad (23)$$

$$M_{ads} = 503,49 \text{ kg}$$

**V.3.2 Calcul du temps d'adsorption**

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

$$t_{ads} = 36,57 \text{ h}$$

**V.3.3 Détermination de l'efficacité d'adsorption**

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

$$EFF = 83,42\%$$

## V.4 Calcul du bilan thermique [43]

### V.4.1 Propriété du gaz de régénération [45]

#### V.4.1.1 Composition du gaz de régénération (voir l'annexe 6)

Tableau V-2 : Composition du gaz de régénération.

Composant	Xi en mole	Tref (k)	Trec (k)	$\Delta H^\circ$ (KJ/Kg)	Mi (Kg/Kmole)	xi % en poids	$\Delta H^\circ * Xi$
C1	0,8386	285,85	553,15	698,30	16	0,72	500,69
C2	0,0743	285,85	553,15	599,60	30	0,12	71,42
C3	0,0186	285,85	553,15	586,64	44	0,04	25,66
iC4	0,0026	285,85	553,15	591,34	58	0,01	4,77
nC4	0,0008	285,85	553,15	592,58	58	0,00	1,47
iC5	0,004	285,85	553,15	585,59	72	0,02	9,01
nC5	0,0009	285,85	553,15	586,78	72	0,00	2,03
C6	0,0003	285,85	553,15	589,15	86	0,00	0,81
N2	0,0557	285,85	553,15	280,49	28	0,08	23,38
CO2	0,0024	285,85	553,15	253,63	44	0,01	1,43
He	0,0018	285,85	553,15	0,00	4	0,00	0,00
	1				18,70	1,00	640,66

#### V.4.1.2 Calcul du poids moléculaire du GN

Calculé à partir de la formule :

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

$$M_{GN} = 18,70 \text{ Kg / Kmole}$$

**V.4.1.3 Calcul de la masse volumique du GN dans les conditions normal  $\rho_{GN}$** 

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

$$Z = 1.$$

$$M_{GN} = 18.70 \text{ Kg / K mole.}$$

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

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

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

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

**V.4.1.4 Calcul de l'enthalpie de chauffage du gaz de 12.7°C à 280°C [44]**

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

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

$\Delta H$  : l'enthalpie qui fournit par le four en (Kj / Kg), Tableau (X.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 la corrélation (voir l'annexe 6).

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

**V.4.2 Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q tamis****V.4.2.1 Calcul de la masse du tamis  $m_t$** 

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

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

$$H_t = 1,8 \text{ m.}$$



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

$$m_t = 3997,96 \text{ Kg}$$

#### V.4.2.2 Calcul de la température moyenne du lit en fin de chauffage [43]

À partir de la relation (6) :

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

$$T_s = 227 \text{ °C} = 500,115 \text{ °K}$$

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

$$T = 200,5 \text{ °C} = 473,65 \text{ °K}$$

$$C_{pt} = 0.921 \text{ Kj/Kg.°C}$$

$$m_t = 3997,96 \text{ Kg}.$$

$$T = 200,5 \text{ °C} = 473,65 \text{ °K}.$$

$$T_{ads} = 25 \text{ °C} = 298,15 \text{ °K}.$$

D'après l'équation (3) :

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

$$Q_{\text{tamis}} = 7,52 \cdot 10^5 \text{ Kj}$$

#### V.4.3 Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage de l'acier

##### V.4.3.1 Calcul du volume de l'acier (Vc) [43]

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

Avec :

**V<sub>c</sub>** : Le volume total de l'acier (m)

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

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

L : La hauteur de la colonne (m).

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

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

$E_p$  : L'épaisseur de l'acier = 0,0368 m.

$d$ : Le diamètre de l'acier = 2.1 m.

L : La hauteur de la colonne = 4,36 m.

$$V_C = 1,144 \text{ m}^3$$

#### V.4.3.2 Calcul de la masse de l'acier $m_c$ :

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

$\rho_{acier}$ : La masse volumique de l'acier (8009,25 kg/m<sup>3</sup>).

$$V_c = 1,144 \text{ m}^3.$$

$$m_c = 9,16 \cdot 10^3 \text{ Kg}$$

Il est nécessaire d'inclure 35% de la quantité d'acier des supports, des pipes et des brides (accessoires).

Alors :

$$m_c = 1,22 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

$C_{pc}$  : La capacité calorifique de l'acier (502 kj/ kg.°C ) [7]

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

D'après l'équation (4) :

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

$$Q_{acier} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ kj}$$

**V.4.4 Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption  $Q_{des}$** 

La quantité d'eau adsorbée  $M_{ads} = 503,49$  kg.

La chaleur de désorption  $\Delta H = 4192,05$  kJ/kg.

D'après l'équation (2) :

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

$$Q_{des} = 2,11 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

**V.4.5 Calcul des pertes de chaleur  $Q_{perte}$** 

D'après l'équation (5) :

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

$$Q_{tamis} = 7,52 \cdot 10^5 \text{ KJ}$$

$$Q_{acier} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ KJ}$$

$$Q_{des} = 2,11 \cdot 10^6 \text{ KJ}$$

$$Q_{perte} = 3,93 \cdot 10^5 \text{ kJ}$$

**V.4.6 Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération  $Q_{totale}$** 

D'après l'équation (1) :

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

$$Q_{totale} = 4,33 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

### V.4.7 Calcul de la chaleur fournie par le four lors du réchauffage $H_f$ [43]

#### - Calcul de l'efficacité thermique du four $1/\varepsilon$ [44]

Efficacité thermique du four lors du réchauffage :

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

t : Temps de chauffage (h).

A partir de l'équation (7) et du tableau (IV-1) :

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

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

$$Q_{\text{totale}} = 4,32 \cdot 10^6 \text{ kj.}$$

$$H_f = 11,39 \cdot 10^6 \text{ kj}$$

### V.4.8 Calcul du temps de réchauffage du tamis $t_r$ [43]

Les données sont illustrées dans le tableau V-3 :

*Tableau V-3 : Les données de réchauffage du tamis.*

<b>Quantité de chaleur apportée par le GN : <math>H_f</math> (Kj)</b>	11,39 $\cdot 10^6$
<b>Déférence de L'enthalpie (<math>\Delta H</math> (280-12.7) (Kj / Nm<sup>3</sup>))</b>	640,66
<b>Masse volumique <math>\rho_{GN}</math> (kg/ Nm<sup>3</sup>)</b>	0,83
<b>Température finale (<math>T_s</math>: °C)</b>	227
<b>Température initiale (<math>T_e</math>: °C)</b>	280

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

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

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

$$\Delta H = 531,75 \text{ Kj/ Nm}^3$$

D'après l'équation (8) :

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

$H_f$  : La chaleur fournie par le four pour le GN ( $11,39 \cdot 10^6$  Kj).

$M_{GN}$  : Le débit du GN sortant du four ( $2000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ).

$\Delta H_{(T_e/T_{ads})}$ : La différence de l'enthalpie du gaz ( $531.75 \text{ Kj/ Nm}^3$ ).

$$t_r = 10.71 \text{ h}$$

#### V.4.9 Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle $H_{f/cycle}$ [43]

D'après l'équation (9) :

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

$t_r = 10,71 \text{ h.}$

$H_f = 11,39 \cdot 10^6 \text{ Kj.}$

$t_{ads} = 36,57 \text{ h.}$

$$H_{f/CYCLE} = 3,32 \cdot 10^6 \text{ kj / h}$$

### V.4.10 Calcul du temps de refroidissement du tamis $t_{ref}$

D'après l'équation (10) :

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

$$Q_{totale} = 4,32 \cdot 10^6 \text{ Kj}$$

$$Q_{acier} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ Kj.}$$

$$Q_{tamis} = 7,52 \cdot 10^5 \text{ Kj.}$$

$$t_r = 10,71 \text{ h}$$

$$t_{ref} = 4,52 \text{ h}$$

### V.4.11 Calcul de la chaleur soutirée au système $Q_{ref}$

D'après l'équation (11) :

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

$$Q_{tamis} = 7,52 \cdot 10^5 \text{ Kj.}$$

$$Q_{acier} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ Kj.}$$

$$t_{ref} = 4,52 \text{ h.}$$

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

## V.5 Calcul du bilan de matière de la régénération [43]

### V.5.1 Calcul du débit du gaz de refroidissement

D'après l'équation (12) :

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

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

$$\Delta H_{(T_s-T_E)} = 531,75 \text{ Kj/ Nm}^3.$$

$$T_s = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 500,15 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_E = 12,7 \text{ }^\circ\text{C} = 285,85 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$M_{\text{ref}} = 754,80 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

## V.5.2 Calcul des pertes de charge [43]

### V.5.2.1 Calcul de la perte de charge $\Delta P/L1$ pour le GN chaud

#### - Calcul de la masse volumique du GN

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

#### - Calcul du coefficient de compressibilité (Z)

En se basant sur cette formule, on peut trouver le facteur de compressibilité :

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

Avec P est la pression du travail exprimé en Psia.

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

$$M_{GN} = 18,70 \text{ Kg / Kmole.}$$

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

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

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

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

$$\rho_{GN} = 1,76 \text{ Kg/ m}^3$$

- **Calcul de la vitesse superficielle  $U_1$  à travers le lit [43]**

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

$$S = 0,503 \text{ m}^2$$

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

$$Mg = 2000 \text{ Nm}^3/\text{h} = 1667,04 \text{ kg} / \text{h}.$$

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

$$U_1 = 31.40 \text{ m} / \text{min}$$

- **Calcul de la viscosité du GN chaud  $\mu_1$**

Connaître la pression de régénération et la densité relative  $dr$  permet de déterminer la viscosité à partir de (l'annexe 8).

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

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

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

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

D'après l'équation (13) :

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

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

$\mu$ : Viscosité du GN (Cp).

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

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

$$\Delta P / L = 0,22 \text{ psi} / \text{ft} = 0,72 \text{ psi} / \text{m}$$



### V.5.2.2 Calcul de $Re_1$

D'après l'équation (14) :

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

$$D_p = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

$$\mu_l = 0,02 \text{ Cp} = 0,059 \text{ kg /m.h.}$$

$$G = Mg / S = 3314,19 \text{ kg/ m}^2\text{.h.}$$

$$Re_1 = 179,75$$

### V.5.2.3 Calcul de la perte de charge $\Delta P/L^2$ pour le GN froid [43]

- Calcul du coefficient de compressibilité ( $Z$ ) [44] [45]

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

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

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

$T_c, P_c$  : paramètres pseudo critiques.

$T_r, P_r$  : température et pression réduites.

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

$$P_c = \sum y_i * P_{ci} \quad P_c = 45,11 \text{ atm}$$

$$Z = f(T_r = 1,47 ; P_r = 0,1).$$

Et selon l'annexe (9 et 10) :  $Z = 0,90 \text{ Kg/m}^3$ .

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

$$Z = 0,90$$

$$M_{GN} = 18,70 \text{ Kg / Kmole.}$$

$$T = 12,7^\circ\text{C} = 285,85 \text{ }^\circ\text{K.}$$

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

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

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

- **Calcul de la vitesse superficielle  $U_2$  à travers le lit [43]**

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

$$S = 0.503 \text{ m}^2$$

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

$$M_g = M_{ref} = 754,80 \text{ Nm}^3/\text{h} = 630.65 \text{ kg / h.}$$

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

$$U_2 = 5,44 \text{ m / min}$$

- **Calcul de la viscosité du GN froid  $\mu_2$  [43]**

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

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

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

$$\mu_2 = 0.01 \text{ Cp} = 0.03 \text{ Lb/ft .h (Voir annexe 8).}$$

D'après l'équation (13) :

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

$$\Delta P/L = 1,68 \cdot 10^{-2} \text{ psi/ft} = 5,51 \cdot 10^{-2} \text{ psi / m}$$

### V.5.2.4 Calcul de Re2 [10]

D'après l'équation (14) :

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

$D_p = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m (Voir annexe 7).

$\mu = 0,01$  Cp = 0,045 kg /m .h

$G = Mg / S = 1253,78$  kg/ m<sup>2</sup>.h

**Re2 = 91,18**

## V.6 Résumé des résultats obtenus

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

Les valeurs calculées	Les valeurs de design
mt =3997,96 kg	mt =3997 kg
Ht =1,8 m	Ht =1,8 m
Hf =11,39 10 <sup>6</sup> = 2.72 10 <sup>6</sup> Kcal /h	0,15 10 <sup>6</sup> < Hf < 3,3 10 <sup>6</sup> Kcal /h
tr = 10,71 h	tr = 11 h
tref = 4,52 h	tref = 5 h
Mg = 2000 Nm <sup>3</sup> /h	1000 < Débit < 2500 Nm <sup>3</sup> /h
$\Delta P1 /L = 0,22$ psi /ft	$0,01 < \Delta P/L < 0,25$ psi /ft
$\Delta P2 /L = 0,0168$ psi /ft	
Re 1= 179,75 Re 2 = 91,18	Re > 100
tads = 36,57h	tads = 36 h

### V.7 Interprétation des résultats

Après avoir mis en pratique la méthode de calcul établie, il est clair que cette dernière est valide et justifiée en raison des résultats obtenus.

En effet, la perte de charge se situe dans l'intervalle recommandé pour effectuer la régénération sans soulever le lit, et la quantité de chaleur fournie par le four est également adéquate.

Le régime d'écoulement est turbulent, favorisant ainsi un bon transfert de masse et une distribution optimale du gaz à travers le sécheur.

Toutes les spécifications de design 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 d'environ 15 ppm, qui constitue le sujet d'étude



**CHAPITRE VI**  
**ETUDE DES SOLUTIONS**

## VI.1 Etude de la première solution [43]

Pour améliorer le temps d'adsorption, on effectue des calculs pour déterminer le temps nécessaire à 15 ppm.

### VI.1.1 Calcul le temps d'adsorption

#### VI.1.1.1 Calcul le débit d'eau $q_w$

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

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

$Y_{in}$  : La teneur en eau dans la charge à l'entrée du sécheur (15 ppm)

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

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

$$q_w = 0,59 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

En raison de la diminution de la teneur en eau dans la charge, le débit d'eau est plus faible que celui calculé précédemment.

#### VI.1.1.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse $H_z$

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

$q_w$ : le débit d'eau en  $\text{kg}/\text{m}^2.\text{h}$ .

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

$R_s$  : la teneur en eau dans la charge de GPL (15 %).

$$H_z = 7,18 \text{ inch} = 0,18 \text{ m}$$

À cause de la baisse de la teneur en eau dans la charge, la zone de transfert se trouve en-dessous de celle calculée précédemment.

**VI.1.1.3 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre  $H_s$** 

$$H_s = H_t - H_z$$

**$H_s$**  : la hauteur de la zone d'équilibre (m).

**$H_z$**  : la longueur de la zone de transfert de masse (m).

**$H_t$**  : la hauteur totale du lit ( $H_t = 1,8\text{m}$ ) (voir l'annexe 7).

$$\mathbf{H_s = 1,62\ m}$$

Comme la hauteur de lit est restée la même, la zone d'équilibre augmente contrairement à la zone de transfert.

**VI.1.1.4 Estimation de la quantité d'eau adsorbée  $M_{ads}$** 

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

**$X_s$**  : la capacité d'adsorption à 25°C,  $X_s = 22\%$  en poids (voir l'annexe 7).

**$\rho_{tamis}$** : Masse volumique du tamis ( $\text{kg/m}^3$ ).

**$C$**  : Constante relative aux tamis moléculaire.

$$\mathbf{M_{ads} = 547,53\ kg}$$

Compte tenu de l'ancienneté de la section de déshydratation, la capacité d'adsorption d'eau du sécheur est insuffisante, ce qui nécessite l'utilisation d'un coefficient de correction  $C=0,45$ .

**VI.1.1.5 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant ( $X$ )**

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

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

$$\mathbf{X = 13,62\ kg\ d'eau / 100\ kg\ de\ dessicant}$$

### VI.1.1.6 Calcul du temps d'adsorption

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

$\rho_{\text{tamis}}$ : Masse volumique du tamis ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$H_t$  : la hauteur totale du lit ( $H_t = 1,8\text{m}$ ).

$q_w$ : le débit d'eau en  $\text{kg}/\text{m}^2.\text{h}$  .

$$t_{\text{ads}} = 268,45 \text{ h}$$

### VI.1.2 Détermination de l'efficacité d'adsorption

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

$$EFF = 95\%$$

Ce qui est notable, c'est que la quantité d'eau réelle adsorbée a effectivement augmenté, ce qui améliore l'efficacité d'adsorption.

### VI.1.3 Calcul du bilan thermique [43]

#### VI.1.3.1 Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption $Q_{\text{des}}$

D'après l'équation (7) :

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

$$M_{\text{ads}} = 547,53 \text{ kg.}$$

$$\Delta H = 4192,05 \text{ kJ/kg.}$$

$$Q_{\text{des}} = 2,29 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$



**VI.1.3.2 Calcul des pertes de chaleur  $Q_{perte}$** 

D'après l'équation (5) :

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

$$Q_{tamis} = 7,52 \cdot 10^5 \text{ Kj}$$

$$Q_{acier} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ Kj}$$

$$Q_{des} = 2,29 \cdot 10^6 \text{ Kj}$$

$$Q_{perte} = 4,11 \cdot 10^5 \text{ kj}$$

**VI.1.3.3 Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération  $Q_{totale}$** 

D'après l'équation (1) :

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

$$Q_{totale} = 4,54 \cdot 10^6 \text{ kj}$$

**VI.1.3.4 Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage  $H_f$** 

D'après l'équation (7) :

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

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

$$Q_{totale} = 4,54 \cdot 10^6 \text{ kj.}$$

$$H_f = 1,18 \cdot 10^7 \text{ kj}$$

**VI.1.3.5 Calcul du temps de réchauffage du tamis  $t_r$** 

D'après l'équation (8) :

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

$$H_f = 1,18 \cdot 10^7 \text{ kJ.}$$

$$\Delta H(T_e/T_{ads}) = 531.75 \text{ kJ/ Nm}^3.$$

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

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

### VI.1.3.6 Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle $H_{f/cycle}$

D'après l'équation (9) :

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

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

$$H_f = 1,18 \cdot 10^7 \text{ KJ.}$$

$$t_{ads} = 268,45 \text{ h.}$$

$$H_{f/CYCLE} = 4,88 \cdot 10^5 \text{ kJ / h}$$

### VI.1.3.7 Calcul du temps de refroidissement du tamis $t_{ref}$

D'après l'équation (10) :

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

$$Q_{totale} = 4,54 \cdot 10^6 \text{ KJ.}$$

$$Q_{acier} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ KJ.}$$

$$Q_{tamis} = 7,52 \cdot 10^5 \text{ KJ.}$$

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

$$t_{ref} = 4,50 \text{ h}$$

**VI.1.3.8 Calcul de la chaleur soutirée au système  $Q_{ref}$** 

D'après l'équation (11) :

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

$$Q_{tamis} = 7,52 \cdot 10^5 \text{ kj}$$

$$Q_{acier} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ kj}$$

$$t_{ref} = 4,50 \text{ h}$$

$$Q_{ref} = 4,06 \cdot 10^5 \text{ kj/ h}$$

**VI.1.4 Calcul du bilan de matière de la régénération [43]****VI.1.4.1 Calcul du débit du gaz de refroidissement**

D'après l'équation (12) :

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

$$Q_{ref} = 4,06 \cdot 10^5 \text{ Kj/ h.}$$

$$\Delta H(T_s - T_e) = 531,75 \text{ Kj/Nm}^3$$

$$T_s = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 500,15 \text{ }^\circ\text{K}$$

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

$$M_{ref} = 763,88 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

**VI.1.4.2 Calcul des pertes de charge [43]**

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

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

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

$$S = 0,503 \text{ m}^2$$

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

$$M_g = 1667,04 \text{ kg} / \text{h}.$$

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

$$U_1 = 31.41 \text{ m} / \text{min}$$

### - Calcul de la viscosité du GN chaud $\mu_1$

Connaître la pression de régénération et la densité relative  $d_r$  permet de déterminer la viscosité à partir de (l'annexe 8)

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

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

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

$$\mu_1 = 0.02 \text{ Cp} = 0.043 \text{ kg} / \text{ft} \cdot \text{h}$$

D'après l'équation (13) :

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

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

$\mu$ : Viscosité du GN (Cp)

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

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

$$\Delta P/L_1 = 0,22 \text{ psi} / \text{ft} = 0,72 \text{ psi} / \text{m}$$

### VI.1.4.3 Calcul de $Re_1$

D'après l'équation (14) :

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

$$D_p = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m .}$$

$$\mu_l = 0,02 \text{ Cp} = 0,059 \text{ kg /m.h.}$$

$$G = M_g / S = 3314,19 \text{ kg/ m}^2\text{.h.}$$

$$\text{Re}_1 = 179,75$$

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

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

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

$$S = 0.503 \text{ m}^2$$

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

$$M_g = M_{\text{ref}} = 763,88 \text{ Nm}^3/\text{h} = 635.03 \text{ kg / h.}$$

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

$$U_2 = 5,41 \text{ m / min}$$

- **Calcul de la viscosité du GN froid  $\mu_2$**

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

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

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

$$\mu_2 = 0.01 \text{ Cp} = 0.03 \text{ Lb/ft.h. (Voir annexe 8).}$$

D'après l'équation (13) :

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

$$\Delta P/L_2 = 0,17 \text{ psi / ft} = 5,58 \cdot 10^{-2} \text{ psi / m}$$

#### VI.1.4.4 Calcul de Re2

D'après l'équation (14) :

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

$D_p = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m. (Voir annexe 7).

$\mu = 0,045$  kg/m.h.

$G = Mg/S = 1262,49$  kg/m<sup>2</sup>.h.

$$\mathbf{Re2 = 91,81}$$

#### VI.1.5 Interprétation des résultats

En se basant sur les résultats obtenus, l'objectif de notre travail a été atteint en ajustant le temps d'absorption du déshydrateur de charge de 36 heures (le temps de design) à 268 heures et 27 minutes suite aux calculs effectués.

Cette modification doit être suivie d'une petite variation de la durée de régénération de 11 heures et 06 minutes pour le réchauffage, 4 heures et 30 minutes pour le refroidissement.

Cette prolongation du temps d'adsorption entraînera :

- Une diminution du nombre de cycles au temps, ce qui entraînera une amélioration de l'efficacité du tamis.
- Des pertes de charge pour le réchauffage et le refroidissement conformes à l'intervalle recommandé.
- Un régime d'écoulement turbulent permettant un transfert de masse efficace et une distribution optimale des gaz dans le lit.

## VI.2 Etude de la deuxième solution

Cette solution repose sur l'optimisation des paramètres de régénération sans modifier la durée du cycle d'adsorption (36 heures).

L'objectif est d'étudier l'influence du temps de chauffage sur la quantité de chaleur requise pour régénérer le sécheur, qui est fournie par le four à chaque cycle.

### VI.2.1 Calcul de la quantité d'eau adsorbée

#### VI.2.1.1 Calcul le débit d'eau $q_w$ [43]

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

$Y_{in}$  : La teneur en eau dans la charge du déshydrateur (15ppm).

$$q_w = 0,12 \text{ kg/m}^2.\text{h}$$

#### VI.2.1.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse $H_z$

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

$$H_z = 7,18 \text{ inch} = 0,18 \text{ m}$$

#### VI.2.1.3 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre $H_s$

$$H_s = H_t - H_z$$

$$H_s = 1,62 \text{ m}$$

#### VI.2.1.4 Estimation de la quantité d'eau adsorbée $M_{ads}$

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

$Y_{in}$  : Concentration de l'eau (15 ppm).

$Q_v$  : Débit volumique du produit (245 m<sup>3</sup> / h)

$\rho_{\text{ppt}}$ : Masse volumique de la charge (530 kg / m<sup>3</sup>)

$\theta$ : le temps d'adsorption (36 h)

$$M_{\text{ads}} = 70,12 \text{ kg}$$

### VI.2.2 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 kg de dessicant (X)

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

$$X = 13,62 \text{ kg d'eau / 100 kg de dessicant}$$

### VI.2.3 Détermination de l'efficacité d'adsorption

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

$$EFF = 95\%$$

### VI.2.4 Calcul du bilan thermique [43]

#### VI.2.4.1 Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption $Q_{\text{des}}$

D'après l'équation (2) :

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

$$M_{\text{ads}} = 70,12 \text{ kg.}$$

$$\Delta H = 4192,05 \text{ kJ/kg.}$$

$$Q_{\text{des}} = 2,94 \cdot 10^5 \text{ kJ}$$



**VI.2.4.2 Calcul des pertes de chaleur  $Q_{\text{perte}}$** 

D'après l'équation (5) :

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

$$Q_{\text{tamis}} = 7,52 \cdot 10^5 \text{ Kj}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ Kj}$$

$$Q_{\text{des}} = 2,93 \cdot 10^5 \text{ Kj}$$

$$Q_{\text{perte}} = 2,12 \cdot 10^5 \text{ kj}$$

**VI.2.4.3 Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération  $Q_{\text{totale}}$** 

D'après l'équation (1) :

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

$$Q_{\text{totale}} = 2,33 \cdot 10^6 \text{ kj}$$

**VI.2.4.4 Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage  $H_f$** 

D'après l'équation (7) :

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

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

$$Q_{\text{totale}} = 2,33 \cdot 10^6 \text{ kj.}$$

$$H_f = 6,14 \cdot 10^6 \text{ kj}$$

**VI.2.4.5 Calcul du temps de réchauffage du tamis  $t_r$** 

D'après l'équation (8) :

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

$$H_f = 6,14 \cdot 10^6 \text{ kj}$$

$$\Delta H = 531.75 \text{ kj/ Nm}^3.$$

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

$$t_r = 5,77 \text{ h}$$

**VI.2.4.6 Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle  $H_{f/cycle}$** 

$$t_r = 5,77 \text{ h}.$$

$$H_f = 6,14 \cdot 10^6 \text{ Kj}.$$

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

D'après l'équation (9) :

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

$$H_{f/CYCLE} = 9,83 \cdot 10^5 \text{ kj /h}$$

**VI.2.4.7 Calcul du temps de refroidissement du tamis  $t_{ref}$** 

D'après l'équation (10) :

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

$$Q_{totale} = 2,33 \cdot 10^6 \text{ kj}.$$

$$Q_{acier} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ kj}.$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7,52 \cdot 10^5 \text{ kj.}$$

$$t_r = 5,77 \text{ h}$$

$$t_{\text{ref}} = 4,52 \text{ h}$$

### VI.2.4.8 Calcul de la chaleur soutirée au système $Q_{\text{ref}}$

D'après l'équation (11) :

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

$$Q_{\text{tamis}} = 7,52 \cdot 10^5 \text{ kj}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ kj}$$

$$t_{\text{ref}} = 4,52 \text{ h}$$

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

## VI.2.5 Calcul du bilan de matière de la régénération [43]

### VI.2.5.1 Calcul du débit du gaz de refroidissement

D'après l'équation (12) :

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

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

$$\Delta H_{(T_s - T_e)} = 531,75 \text{ Kj/Nm}^3$$

$$T_s = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 500,15 \text{ }^\circ\text{K}$$

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

$$M_{\text{ref}} = 754,80 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

### VI.2.6 Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus, il est clairement évident que la durée de régénération a été modifiée.

On observe une diminution du temps de chauffage jusqu'à 5 heures et 46 minutes et une durée de refroidissement de 4 heures et 31 minutes, sans affecter la durée du cycle d'adsorption de 36 heures.

Le four fournit moins d'énergie par cycle de fonctionnement en raison de la même quantité de gaz naturel utilisée pour un cycle d'adsorption plus long par rapport à un cycle de 36 heures.

Pendant l'étape d'adsorption, les dessiccants se chargent d'humidité, ce qui se traduit par un état de saturation à l'équilibre. Lorsque le dessiccant est saturé, il cesse d'adsorber et une régénération est nécessaire après le chargement. Pendant cette séquence, l'humidité est éliminée par un chauffage.

Dans le cas où le lit n'est pas complètement saturé, le chauffage de la partie sèche du lit devient inutile et peut entraîner la dégradation du tamis, donc réduisant son efficacité. Ce résultat est valable quel que soit la teneur en eau dans la charge.

### VI.3 Comparaison entre les deux solutions optimales

#### VI.3.1 Première solution

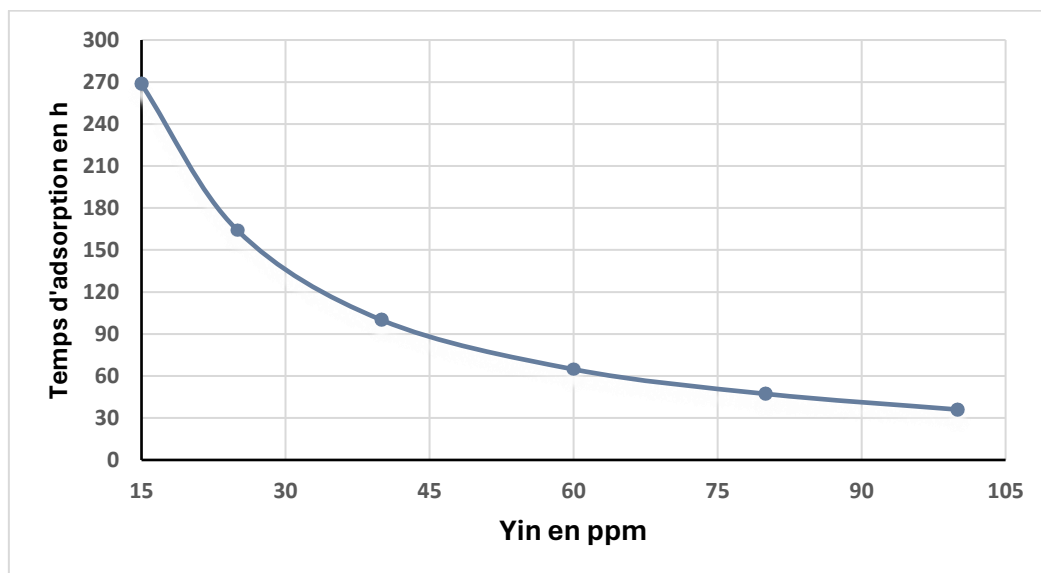
- Cette solution consiste à fixer le temps de régénération et à modifier le temps d'adsorption. Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau VI-1.

*Tableau VI-1 : La variation du temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau pour un temps de régénération fixé.*

Teneur en eau en ppm	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	25	<b>15</b>
Temps d'adsorption(h)	<b>36</b>	<b>47,23</b>	<b>64,77</b>	<b>100,05</b>	<b>164</b>	<b>268,45</b>
Temps de Réchauffage (h)	11	11	11	11	11	<b>11</b>
Nombre d'heures par an	8760	8760	8760	8760	8760	<b>8760</b>
Débit de Réchauffage (m <sup>3</sup> /h)	2000	2000	2000	2000	2000	<b>2000</b>
Nombre de régénération par un an	243	185	135	87	53	<b>32</b>
Quantité de GN pour le réchauffage pendant une régénération	22000	22000	22000	22000	22000	<b>22000</b>
Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an	5346000	4070000	2970000	1914000	1166000	<b>704000</b>
Gain en GN par ans et par train en Nm <sup>3</sup>		<b>1276000</b>	<b>2376000</b>	<b>3432000</b>	<b>4180000</b>	<b>4642000</b>

La figure suivante illustre graphiquement la prolongation du temps d'adsorption. En utilisant une interpolation simple, il est possible de calculer le temps d'adsorption en fonction de la quantité d'eau présente dans la charge.

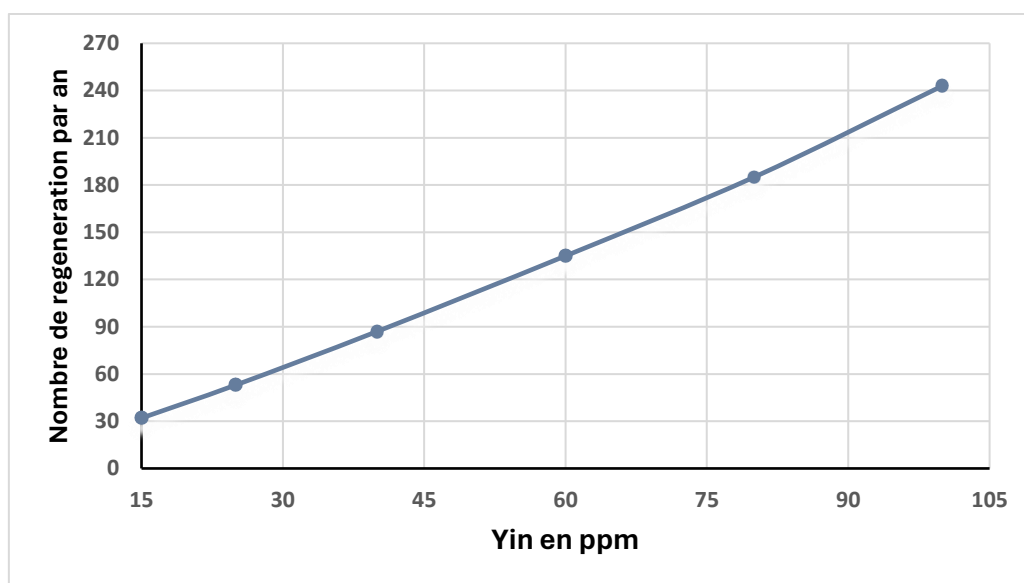
- On remarque que plus la teneur en eau diminue, plus le temps d'adsorption augmente.



*Figure VI-1 : Le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau.*

Dans cette figure ci-dessous, l'évolution du nombre de régénérations annuelles est donnée en fonction de la teneur en eau de la charge.

- On remarque que le nombre de régénération diminue proportionnellement à la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL.



*Figure VI-2 : Le nombre de régénération par an en fonction de la teneur en eau.*

### VI.3.2 Deuxième solution

- Cette solution consiste à fixer le temps d'adsorption et à modifier le temps de régénération.

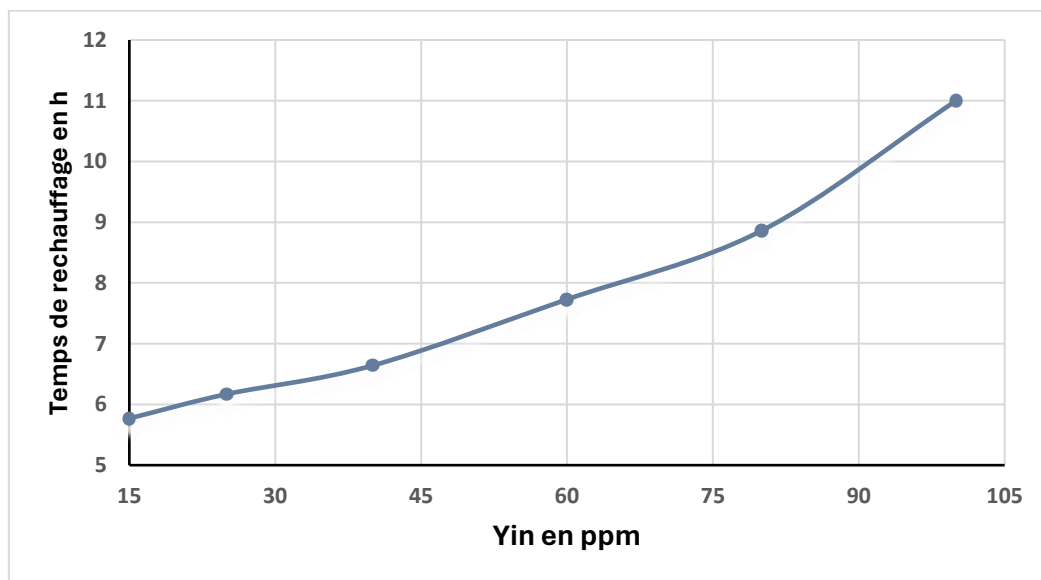
Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau VI-2 :

**Tableau VI-2 : La variation du temps de régénération en fonction de la teneur en eau pour un temps d'adsorption fixé.**

Teneur en eau en ppm	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>25</b>	<b>15</b>
Temps d'adsorption (h)	36	36	36	36	36	36
Temps de réchauffage (h)	<b>11</b>	<b>8,86</b>	<b>7,73</b>	<b>6,64</b>	<b>6.17</b>	<b>5,77</b>
Nombre d'heures par an	8760	8760	8760	8760	8760	8760
Débit de réchauffage (m <sup>3</sup> /h)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Nombre de régénération par un an	243	243	243	243	243	243
Quantité de GN pour le réchauffage pendant une régénération (m <sup>3</sup> )	22000	17720	15460	13280	12340	11540
Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an	5346000	4305960	3756780	3227040	2998620	2804220
Gain en quantité de GN par ans et par train en Nm <sup>3</sup>		<b>1040040</b>	<b>1589220</b>	<b>2118960</b>	<b>2347380</b>	<b>2541780</b>

En conservant le temps d'adsorption à 36 heures, la figure ci-dessous représente le temps de réchauffage calculé en fonction de la teneur en eau dans la charge.

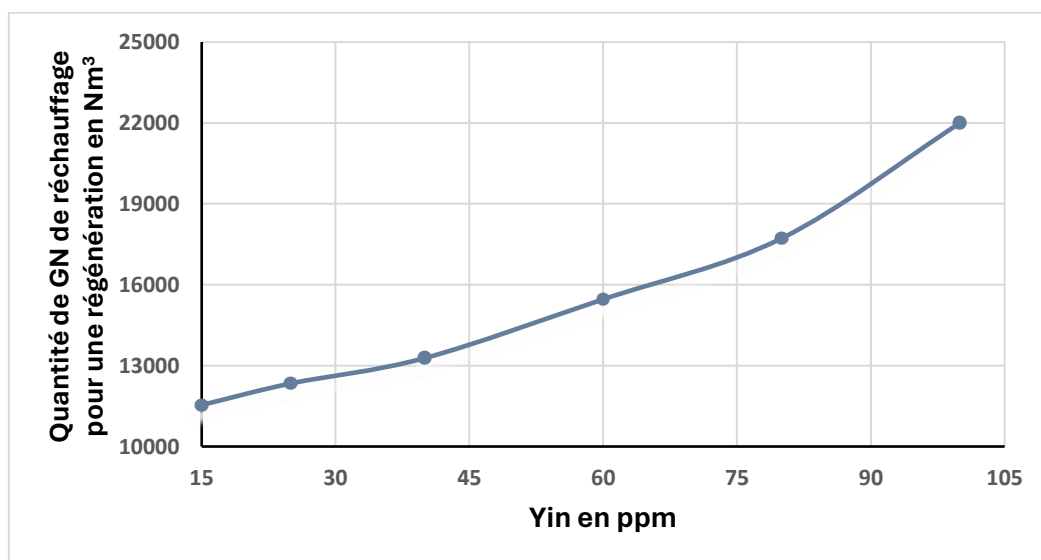
- On remarque que le temps nécessaire pour le réchauffage diminue proportionnellement à la diminution de la teneur en eau dans la charge de GPL.



*Figure VI-3 : Le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau.*

La dépense énergétique (Quantité de Gaz Naturel) pour la séquence de chauffage diminue 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 de GPL.

Cette conclusion est illustrée dans la figure ci-dessous :



*Figure VI-4 : Quantité de GN utilisée lors d'une régénération en fonction de la teneur en eau.*



#### VI.4 Comparaison entre la première solution et la deuxième solution concernant la quantité de gaz naturel consommée et économisée

La figure ci-dessous représente la quantité de GN pour le réchauffage pendant un an en fonction de la teneur en eau dans la charge.

- On remarque que la quantité de gaz naturel est moindre dans la première solution par rapport à la quantité de gaz dans la deuxième solution (Figure VI-5) en raison de la diminution du nombre de cycles de régénération annuels, et cela est dû à l'augmentation du temps d'adsorption avec la diminution de la teneur en eau dans la charge.

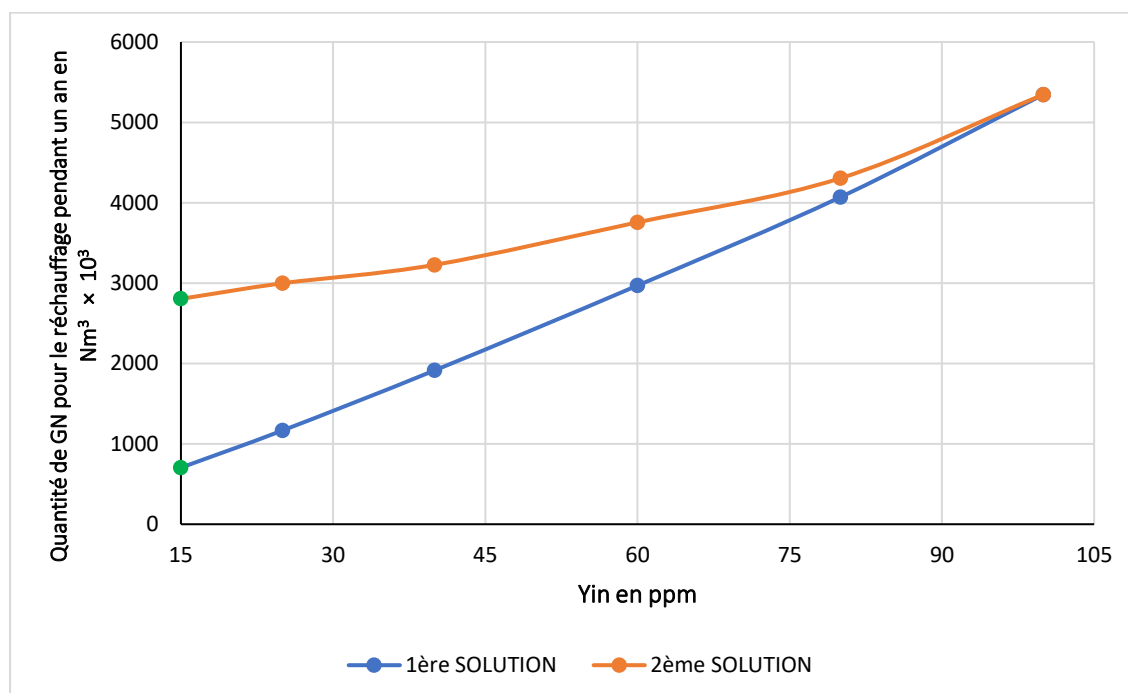
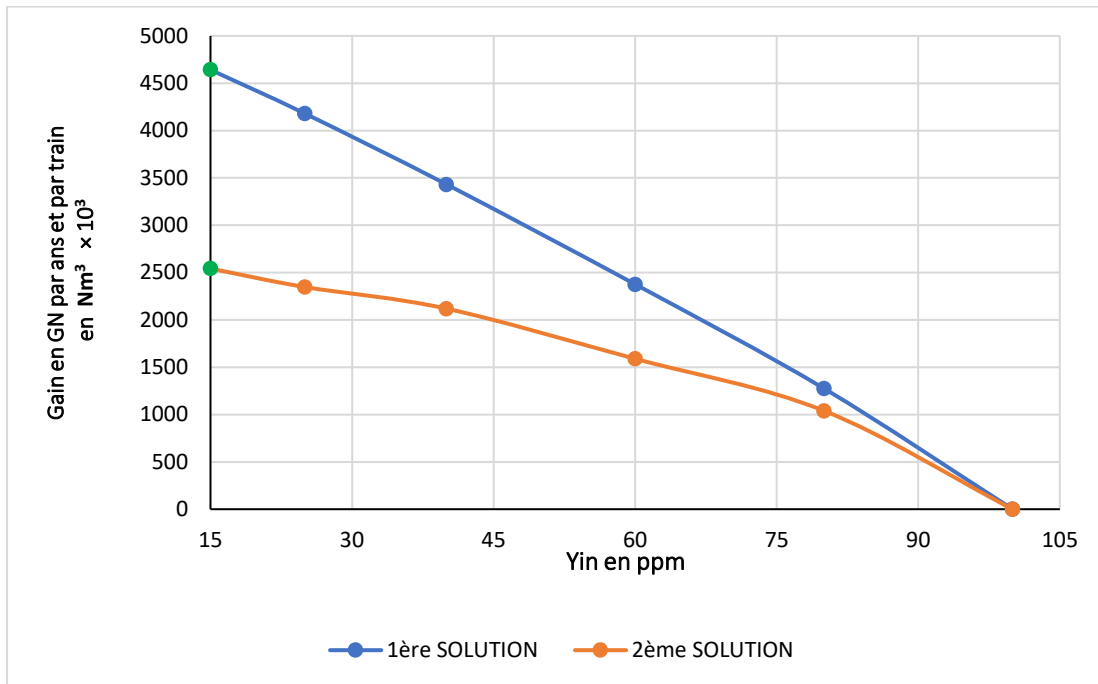


Figure VI-5 : Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an en fonction de la teneur en eau.

La figure ci-dessous représente le gain en quantité de GN pendant un an par train en fonction de la teneur en eau dans la charge.

- Nous remarquons une augmentation du gain en quantité de GN consommée, qui est plus élevée dans la première solution, comme le montre la Figure (VI-6).



*Figure VI-6 : Gain en quantité de GN pendant un an par train en fonction de la teneur en eau.*

## VI.5 Interprétation et choix de la solution optimale

Selon tous les résultats obtenus, l'optimisation du fonctionnement de la section de déshydratation de la charge ne peut être réalisée que par la mise en œuvre de la solution optimale : **prolongation du temps d'adsorption du sécheur.**

Cette augmentation présente plusieurs avantages pour le système, notamment la réduction du nombre de cycles par mois, ce qui entraîne :

1. Une diminution de la consommation de gaz naturel pendant la régénération de la séquence de refroidissement.
2. Une diminution de la perte lors du processus de régénération du GPL piégé dans le tamis moléculaire.
3. Une diminution de la chaleur fournie par le four pour la séquence de chauffage se produit lorsqu'on chauffe un lit partiellement rempli d'eau, calculée en fonction de la saturation totale du lit. En conséquence, chauffer un tamis sans eau entraîne une perte d'énergie.
4. Une prolongation de la durée de vie du tamis moléculaire.
5. Une amélioration de l'efficacité du tamis grâce à la réduction de la destruction des cristaux.

De plus, aucun investissement n'est nécessaire pour mettre en œuvre cette idée.



**CHAPITRE VII**  
**ETUDE ECONOMIQUE**

## VII.1 Introduction

Pour valoriser la solution adoptée dans ce travail, nous suggérons d'estimer le gain en gaz naturel réalisée en prolongeant la durée de la phase d'adsorption à 268,45 heures tout en conservant les séquences de chauffage et de refroidissement identiques aux designs. Cette solution nous permet également de protéger les tamis moléculaires et d'augmenter leur durée de vie, générant ainsi des économies supplémentaires lors de l'achat de nouveaux tamis.

## VII.2 Etude économique des résultats de la solution optimale

### VII.2.1 Gain en gaz naturel

Le cycle d'adsorption de 268,45 heures, avec une teneur en eau de 15 ppm à l'entrée et une teneur de 5 ppm à la sortie du déshydrateur de charge, a nécessité un temps d'adsorption de 268,45 heures.

- Le nombre de cycle /mois = nombre d'heures par mois / durée d'un cycle

$$= 720 / 164 = 3 \text{ cycles.}$$

- Le débit de GN durant :

Le chauffage : 2000 Nm<sup>3</sup>/h.

Le refroidissement : 760 Nm<sup>3</sup>/h.

- Le nombre de cycle actuel = 720 / 36 = 20 cycles.
- Pour un train, le nombre de cycles gagnés par mois = (nombre de cycle actuel – le nombre de cycle plus long) = 20 – 3 = 17 cycles.

(10,71 heures de réchauffage et 4,52 heures de refroidissement).

- Le gain en GN chaud pour un train par mois = 17 \* 10,71 \* 2000

$$= 364140 \text{ Nm}^3 / \text{mois.}$$

- Et pour 9 trains = 364 140 \* 9 = 3 277 260 Nm<sup>3</sup>/ mois.

- Le gain en GN froid pour un train par mois =  $17 \cdot 4,52 \cdot 760$

$$= 58\,398,4 \text{ Nm}^3 / \text{mois.}$$

- Et pour 9 trains =  $58\,398,4 \cdot 9 = 525\,585,6 \text{ Nm}^3 / \text{mois.}$

- $1,069 \text{ Nm}^3 = 1 \text{ Contra m}^3$
- 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 :

$$\text{Le GN de chauffage : } 1,255 \cdot 3\,277\,260 = 4,11 \cdot 10^6 \text{ DA.}$$

$$\text{Le GN de refroidissement : } 1,255 \cdot 525\,585,6 = 6,60 \cdot 10^5 \text{ DA.}$$

- Au niveau du four, on récupère la moitié de la quantité de Gaz Naturel de régénération.

Entraînant un gain mensuel pour les 9 trains.

$$= (4,11 \cdot 10^6 + 6,60 \cdot 10^5) / 2 = 2,39 \cdot 10^6 \text{ DA}$$

- Le gain réel annuel pour 9 trains par an =  $12 \cdot 2,39 \cdot 10^6$

$$= 28,68 \cdot 10^6 \text{ DA.}$$

## VII.2.2 Gain en vie du tamis moléculaire

- Le déshydrateur contient un total de 4 653 kg de tamis moléculaire.
- En mars 2017, le coût de remplacement du tamis pour le train 200 était de 355,08 DA/kg.
- Cela donne un coût total de 1 652 187 DA ( $4\,653 \cdot 355,08$ ) pour le remplacement du tamis pour un déshydrateur.
- La durée de vie actuelle du tamis moléculaire est de 3 ans.
- Le remplacement des tamis pour la phase I et la phase III intervient tous les 9 ans, en raison de la présence de 3 déshydrateurs par train.

- Le remplacement des tamis pour la phase II intervient tous les 6 ans, en raison de la présence de 2 déshydrateurs par train.
- Le coût annuel de remplacement du tamis moléculaire pour un déshydrateur revient :
- Pour la phase I 183 576,33 DA (1 652 187 /9).
- Pour la phase II 275 364,5 DA (1 652 187 /6).
- Pour la phase III 183 576,33 DA (1 652 187 /9).
- Cela correspond à un cycle de 55 heures (36 heures d'adsorption et 19 heures de régénération) pour un sécheur.
- En prolongeant le cycle d'adsorption à 287,45 heures (268,45 heures d'adsorption et 19 heures de régénération), la durée de vie du sécheur dans les phases I et III atteint environ:

$$287,45 \cdot 9 / 55 \approx 47 \text{ ans}$$

- Le coût du tamis moléculaire de la phase I avec ce nouveau cycle est estimé à 35 152,91 DA (1 652 187 /47), générant un gain annuel de 148 423,41 DA

$$(183 576,33 - 35152,91).$$

- Dans la phase II, la durée de vie du sécheur devient :

$$287,45 \cdot 6 / 55 = 31,35 \text{ ans}$$

- Le coût du tamis moléculaire de la phase II avec ce nouveau cycle est estimé à 52 701,33 DA (1 652 187 /31,35), générant un gain annuel de 222 663,17 DA

$$(275 364,5 - 52701,33)$$

- Le coût du tamis moléculaire de la phase III avec ce nouveau cycle est estimé à 35 152,91 DA (1 652 187 /47), générant un gain annuel de 148 423,41 DA (183 576,33 – 35152,91).

- Un gain annuel total pour le complexe de 4 007 544,29 DA  
 $[(148\,423,41 * 12) + (222\,663,17 * 4) + (148\,423,41 * 9)]$ .
- Le gain annuel total pour le complexe est de 4 007 544,29 DA, calculé comme  
 $[(148\,423,41 * 12) + (222\,663,17 * 4) + (148\,423,41 * 9)]$ .  
 12 déshydrateurs : 4 trains pour la phase I × 3 déshydrateurs pour chaque train.  
 4 déshydrateurs : 2 trains pour la phase II × 2 déshydrateurs pour chaque train.  
 9 déshydrateurs : 3 trains pour la phase III × 3 déshydrateurs pour chaque train.

Les résultats sont résumés dans le tableau VII-1.

*Tableau VII-1 : Gain annuel en GN et en vie des tamis pour le cycle calculé.*

	Cycle calculé
<b>Gain annuel en GN pour 9 trains en DA</b>	<b>28,68 10<sup>6</sup></b>
<b>Gain annuel en vie des tamis pour le complexe en DA</b>	<b>4 10<sup>6</sup></b>
<b>Gain annuel total</b>	<b>32,68 10<sup>6</sup></b>



## *Conclusion générale*

Il convient de noter que les sources d'énergie ont aujourd'hui une part significative dans notre économie nationale, ce qui implique que toute perte d'énergie, quelle que soit sa nature ou son étendue, peut directement influencer les coûts d'exploitation et les produits finis.

Les préoccupations au sein du complexe GP1/Z concernent la réduction de la teneur en eau de l'alimentation de 100 ppm à 1 ppm dans la section de déshydratation.

Pendant notre stage, il nous a semblé crucial d'étudier ce problème afin d'optimiser les paramètres de fonctionnement de la section déshydratation de charge.

Par conséquent, deux solutions ont été examinées dans le cadre de cette étude et qui ont donnés des résultats différents. Selon ces résultats, il est possible d'atteindre notre but en :

- Augmentant le temps d'adsorption, en tenant compte de la teneur en eau dans la charge, notant que ce temps diminue avec l'augmentation de la teneur en eau dans la charge.
- Modifiant la durée de régénération (durée de chauffage et de refroidissement).

Un prolongement du temps d'adsorption conduit au gain en énergie car la même quantité de gaz naturel sera utilisée pour un cycle plus étendu que celui actuel.

En plus des économies réalisées en gaz naturel, un gain additionnel sera atteint pour :

- La durée de vie du tamis moléculaires sera prolongée, car son vieillissement est principalement dû au dépôt de coke à haute température.
- Avec une adsorption prolongée, le nombre de cycles de régénération serait réduit, limitant ainsi l'exposition du tamis à des températures élevées pendant la séquence de chauffage.
- En raison d'un nombre de cycles moindre, la durée de vie du matériel sera prolongée en raison de la réduction des contraintes de pression (moins de séquences de pressurisations et dépressurisations) et de température (réchauffages et refroidissements).
- La durée de vie de la robinetterie sera prolongée, car les séquences d'ouverture et de fermeture des vannes seront réduites.

Grâce à cette optimisation, nous économiserons une quantité de  $2.74 \times 10^7$  Nm<sup>3</sup> de GN, ce qui équivaut à une valeur annuelle de  $15.5 \times 10^6$  DA.

De plus, elle permettra de réaliser une économie annuelle de  $2,74 \times 10^7$  DA pour les tamis moléculaires.

---

## *Références bibliographiques*

- [1] Manuel Opérateur GP1/Z, Généralités sur le complexe GP1Z.
- [2] Manuel opératoire ; process : volume 1 et 2. Document GP1-Z
- [3] Manuel Opérateur GP1/Z, Stockage de la charge, Section 1, Volume 2.
- [4] Manuel Opérateur GP1/Z, Process, Section 2, Volume 4.
- [5] Manuel Opérateur GP1/Z section de séparation.
- [6] Manuel Opérateur GP1/Z, Utilités, Section 7, Volume 1.
- [7] Catalogue mécanique ; manuel : volume 1. Document GP1-Z
- [8] Manuel Opérateur GP1/Z, Stockage et expédition, Section 4, Volume 3.
- [9]. Catalogue Mécanique ; process 3 : volume 1. IHI GP-1Z.
- [10] P. Wuithier le pétrolé, raffinage et génie chimie, Edition technip, Paris, 1972.
- [11]. Polycope I.A.P “ propane liquide déshydratation usine moléculaire Seive”
- [12]. Revue de I.F.P.Gras pretreatment: w.w Weternan Institut of gas technology Chicago
- [13] J. P. Wauquier, procedes de separation, Tome II, Edition Technip, 1998.
- [14] ROBERT, C. REID, J. M. PRAUSNITZ et THOMAS K. SHERWOOD, The properties of Gases and Liquids, Third Edition.
- [15]. DATA BOOK ; Engineering.
- [16] Service laboratoire, département technique, GP1/Z.
- [17] Manuel opératoire ; section déshydratation. Document GP1-Z
- [18] DATA BOOK Déshydratation and treating. section 15,9 éme edition, Rev (1974 – 1976).
- [19] M.Moojier-Van den Heave, phase Behaviour and Structural Aspects of Ternary casthate hydrate systems, these de doctorat, Technische université Delft (2004).
- [20] E. Dendy Sloan, C. A. Koh, Clathrate hydrates of Natural Gases, Third Edition, taylor and Francis Group (2008).p.644-669.

- [21] S. Mokhatab, R. J. Wilkens, K. J. Leontaritis, A Review Strategies for Solving Gas Hydrate Problems in Subsea Pipelines, Energy Sources, Part A, Vol. 39, p. 39-45, 2007
- [22] ROJEY.A, Le gaz naturel, production traitement transport, 27 Rue Ginoux -75737 Paris cedex 15 : TECHNIP, 1994.430p, (L'Institut Français du Pétrole).
- [23] W. P. Mainning, H. S. Wood, Guidelines for glycol dehydrator design: parte 1, Hydrocarbon processing, Vol. 72, N° 1, p. 106-114, January, 1993a.
- [24] M. H. Yousif, Effect of Under-Inhibition with Methanol and Ethylene Glycol on the Hydrate Control Process, Offshore Tech. Conference, p. 741-748, 1996.
- [25] F. E. Anderson, and J. M. Prausnitz, Inhibition of Gas Hydrate by Methanol, J. AIChE, Vol. 32, N° 8, p. 1321-1333, 1986
- [26] Déshydratation Bloc 11, module 3.
- [27] Pr. Chems Eddine CHITOUR -Physico -chimique des surfaces – (tome 2). Édition; OPU.01-2004.
- [28] E. Worch, Adsorption Technology in Water Treatment, Edition Hubert & Co. GmbH & Co. KG, Gottingen, Germany, (2012).
- [29] F. Berais , N. Hamdi , 'Optimisation de la déshydratation et prolongation de la séquence de régénération', Mémoire pour l'obtention du grade d'ingénieur Spécialisé en PROCESS GAZ.
- [30] N.Gherbi (2008), 'Etude expérimentale et identification du processus de rétention des cations métalliques par des matériaux naturels', Mémoire de doctorat, Université de Constantine.
- [31] R. PERRIN, J. PSCHARFF, « chimie industrielle », 2ème Edition Dunod, Paris, 1999, pp: 661-679.
- [32] Adamson I.Y.R., Bowden D.H.The type II cells as progenitor of alveolar epithelial regeneration : A cytodynamic study in mince after exposure to oxygen . Lad. Invest., (1978),30,35-42.
- [33] MANOLE CREANGA, Carmen. Procédé AD-OX d'élimination de polluants organiques non biodégradables (par adsorption puis oxydation catalytique). Thèse de doctorat. 2007. INPT.

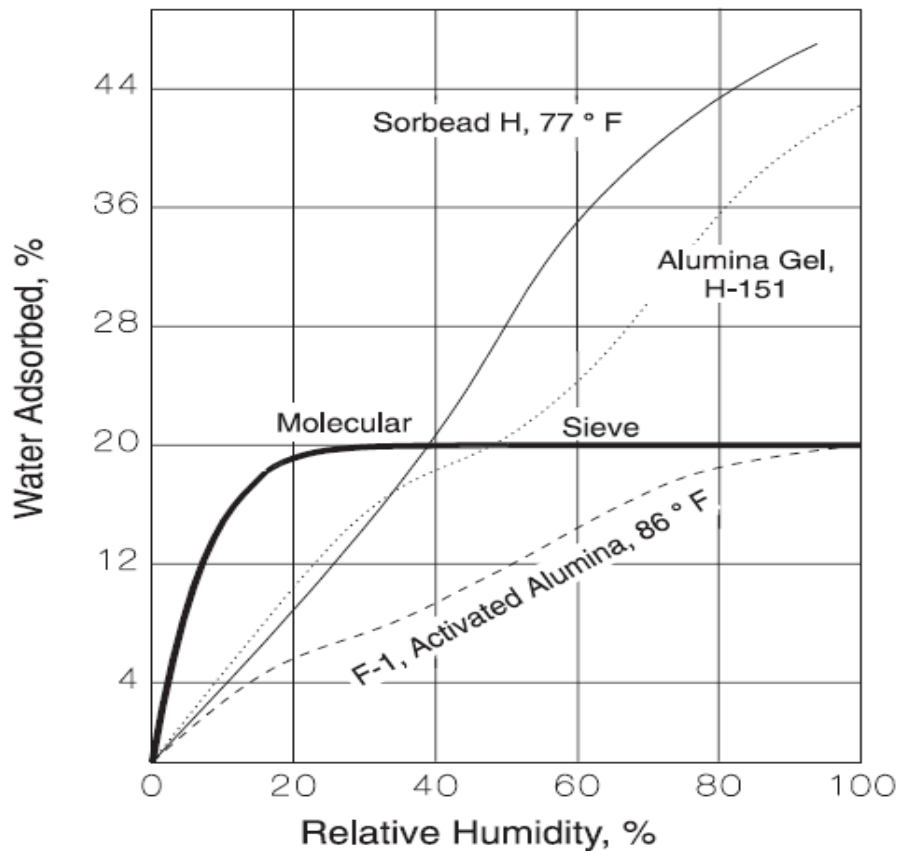
- [34] Exploration et Production Le Process TOTAL.p.7.
- [35] Dimensionnement des déshydrateurs de gaz de l'unité GPL2 Hassi-Messaoud : Calculs et vérification. Présenté par : HADJ MOHAMMED Loukmane et DJAMEL Ahmed.
- [36] Bouazzabia. M, les adsorbants dans l'industrie pétrolière et gazière. IAP : 2004. P-12-15.
- [37] Engineering data book; « gaz processor supplies association ninth edition»; 2000;150,220.
- [38] COULSON and RICHARDSON'S. Chemical Engineering, particles technologies and separation process. Fifth edition, 2002.p.1208.
- [39] Yaws, C.L. et al ; « Hydrocarbonés : Deshydratation Data » ; chem. Eng. Vol.97 avril 1990
- [40] Combell.M. Gaz conditioning and processing, VOL 2,The equipment modules. p.373-408.
- [41] Optimisation des paramètres de marche de la section déshydratation au niveau du train 70 (Rhourde Nouss). Présenté par : LAGGOUN Fares, MAGROUD Ayoub et TEI Bachir.
- [42] Grace ; les tamis moléculaire Caractéristiques et Applications Western Germany ; Juin 1980.
- [43] RUTHVEN D. M; principles of adsorption and adsorption process John Wiley et sons, newYork.
- [44] Formation perfectionnement d'ingenieur.
- [45] Sherwood; propriétés des of gaz and liquids.



**ANNEXES**

# Annexe (1)

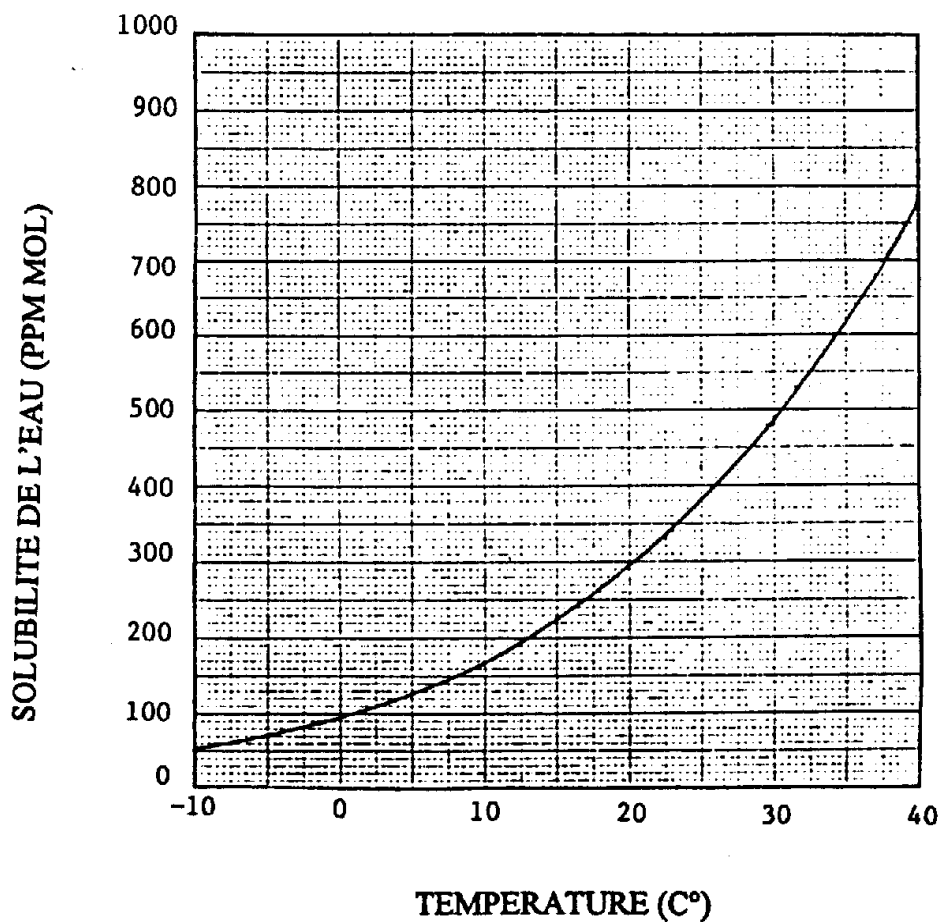
**Static Equilibrium Capacity vs. Relative Humidity for Selected Solid Desiccants<sup>43</sup>**



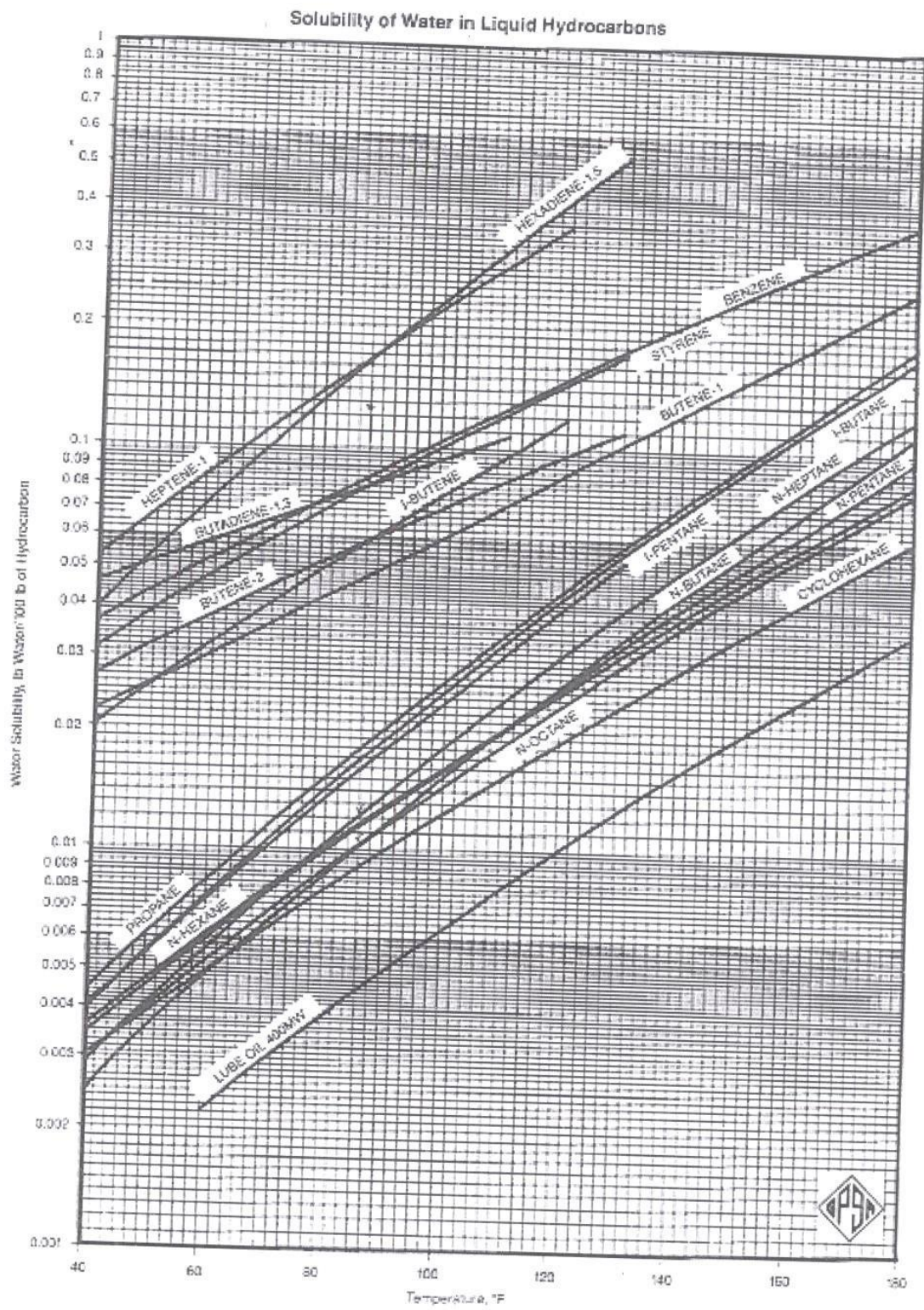
## Annexe (2)

### SOLUBILITE DE L'EAU DANS LA CHARGE DE GPL

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



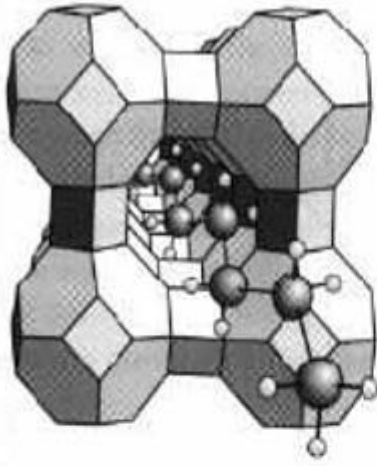
### Annexe (3)



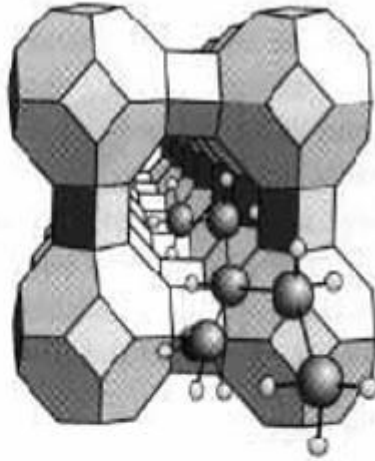
La solubilité de l'eau dans les hydrocarbures liquide



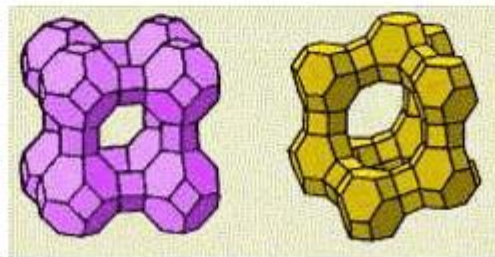
## Annexe (4)



Structure de zéolithe de type A

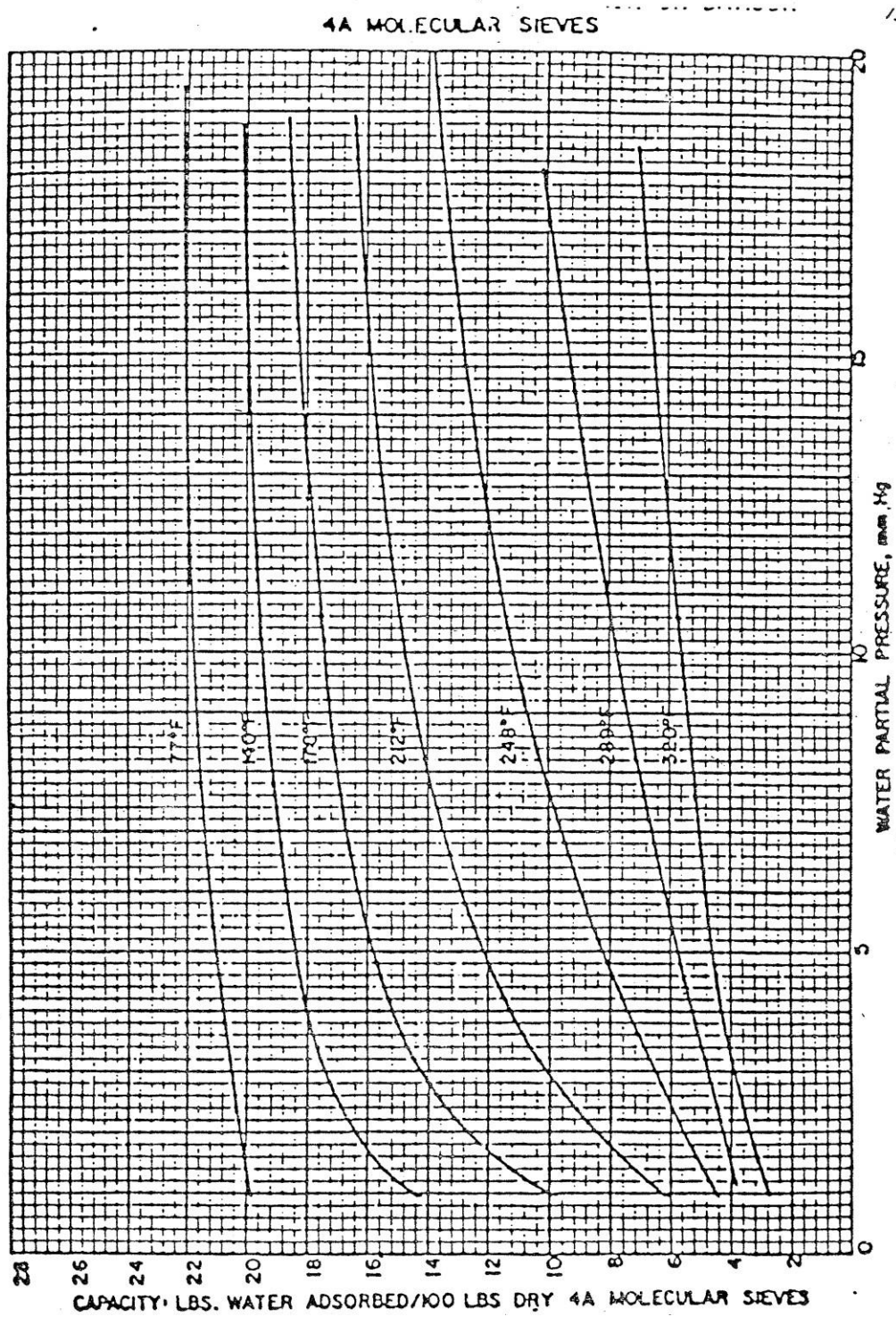


Structure de zéolithe de type X



Tamis moléculaires

Annexe (5)



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

# Annexe (6)

## Coefficient de l'équation d'enthalpie H°

Tableau 2.1 - Coefficients des équations du pouvoir calorifique, de l'enthalpie et de l'entropie des mélanges de gaz parfaits.

No. CPT	Composant	A	B	C x 10 <sup>3</sup>	D x 10 <sup>6</sup>	E x 10 <sup>8</sup>	F x 10 <sup>9</sup>	G	Intervalle °C
<i>Non-Hydrocarbones</i>									
1	Oxygène	-2,283574	0,952440	-0,281140	0,655223	-0,452316	1,087744	2,080310	-175 to 1200
2	Hydrogène	28,671997	13,396156	2,960131	-3,980744	2,661667	-6,099863	-1,801371	-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	-0,379030	-0,530964	2,059134	3,388342	-75 to 1200
19	n-Hexane	-17,191071	0,959226	-0,614725	6,142101	-6,160952	20,868190	-0,207040	-75 to 700
20	2-Méthylpentane	33,798408	0,173685	2,348998	0,844100	-1,559115	5,534684	2,968423	-75 to 700
21	3-Méthylpentane	17,964768	0,397799	1,209870	3,254556	-3,942661	14,384148	2,149541	-75 to 700
22	2,2-Diméthylbutane	92,706801	-0,500323	4,525783	-2,415290	0,713199	-0,591097	5,617113	-20 to 700
23	n-Heptane	-0,153725	0,754499	0,261728	4,366358	-4,484510	14,842099	0,380048	-75 to 700
24	2-Méthylhexane	17,893709	0,404849	1,334653	2,877698	-3,511818	12,540055	1,823456	-75 to 700
25	3-Méthylhexane	36,807299	0,167431	2,262250	1,067097	-1,781538	6,169491	2,864993	-75 to 700
26	2,4-Diméthylpentane	11,508769	0,093303	2,598254	0,630349	1,428307	4,569218	2,847131	-20 to 700
27	n-Octane	2,604725	0,724670	0,367845	4,142833	-4,240199	13,734055	0,327588	-75 to 700
28	2,2-Diméthylhexane	21,451302	0,226073	2,074483	1,466277	-2,169048	7,742088	2,139163	-20 to 700
29	2-Méthylheptane	27,405630	0,305110	1,826883	1,744174	-2,311344	7,752627	2,038844	-75 to 700
30	2,2,4-Triméthylpentane	26,118096	0,039675	2,742294	0,328610	-1,206014	4,586420	2,846608	-75 to 700
31	n-Nonane	4,000278	0,707805	0,438048	3,969342	-4,043158	12,876028	0,257265	-75 to 700
32	n-Décane	-6,962020	0,851375	-0,263041	5,521816	-5,631733	18,885443	-0,412446	-75 to 700
33	n-Undécane	65,290564	-0,099827	3,472495	-1,354336	0,264721	-0,145574	3,407959	-20 to 1200
34	m-Dodécane	60,967391	-0,077548	3,420649	-1,308559	0,247576	-0,130380	3,227042	-20 to 1200
35	n-Tridécane	62,748642	-0,096018	3,463033	-1,353243	0,264564	-0,145439	3,245905	-20 to 1200
36	n-Tétradécane	61,655096	-0,092312	3,452192	-1,345181	0,261574	-0,143007	3,172971	-20 to 1200
37	n-Pentadécane	62,217244	-0,100961	3,472075	-1,366935	0,269684	-0,150082	3,163060	-20 to 1200
38	n-Hexadécane	60,927011	-0,095563	3,459313	-1,356807	0,265935	-0,146753	3,095128	-20 to 1200
39	n-Heptadécane	60,853132	-0,098655	3,465969	-1,365537	0,269340	-0,149768	3,071276	-20 to 1200
40	n-Octadécane	60,419501	-0,098876	3,466295	-1,367430	0,270024	-0,150334	3,038272	-20 to 1200
41	n-Nonadécane	59,195816	-0,092752	3,451465	-1,354690	0,265281	-0,146249	2,979932	-20 to 1200
42	n-Eicosane	59,163624	-0,095147	3,456592	-1,360776	0,267410	-0,147933	2,965523	-20 to 1200

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

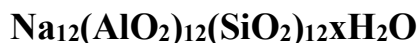
S = 1 kJ/kg K pour le gaz parfait à 0 K et 1 kPa

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

## Annexe (7)

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

#### FORMULE CHIMIQUE



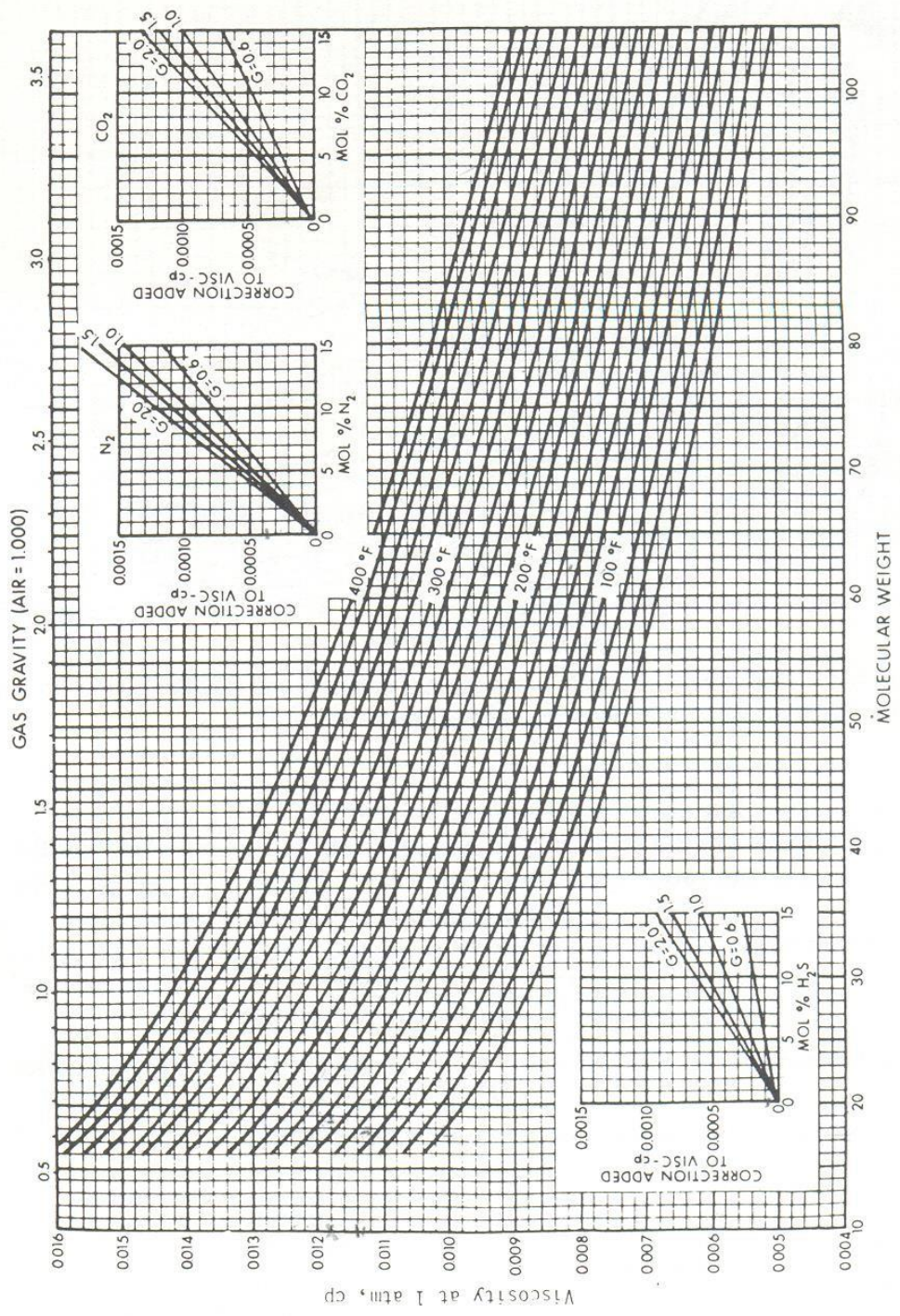
#### Conditions d'expédition

Le tamis moléculaire de type 4A-DG TRISIV 1/8 est disponible sous forme de granulés de 3,2 mm. Il est expédié sous containers acier, d'un poids net de 135 kg le container.

Propriétés typiques	Granulés 1/8"
Diamètre nominal des pores	4 angströms
Densité "non tassé" (moyenne)	640 kg/cm <sup>3</sup>
Densité "tasse"	624 à 657 kg/m <sup>3</sup>
Diamètre particule	3,2 mm
Résistance à l'écrasement	6,8 à 7,7 kg
Chaleur d'adsorption (max.)	1.000 kcal/kg H <sub>2</sub> O
Capacité en eau à l'équilibre*	22% en poids
Teneur en eau (à l'emballage)	1,5% en poids

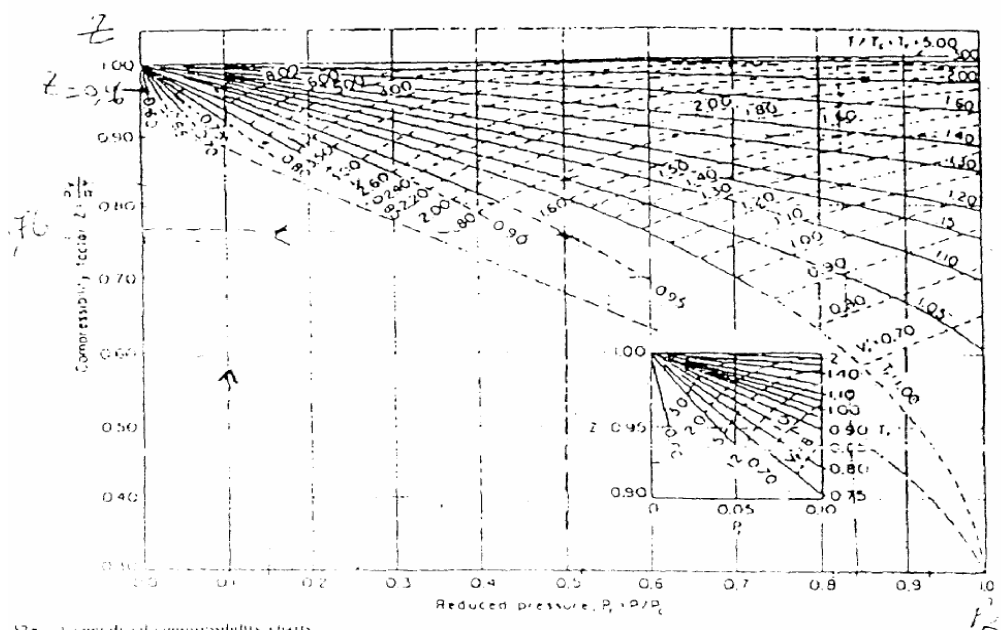
\* En Lbs d'eau/100 lbs d'adsorbant activité à 17,5 mm Hg, 25°C.

# Annexe (8)



La viscosité  $\mu_g$  du gaz à la pression et température d'intérêt.

# Annexe (9)



12a Generalized compressibility charts  
 $\frac{V}{V_c} = \frac{ZT}{Z_c T_c}$

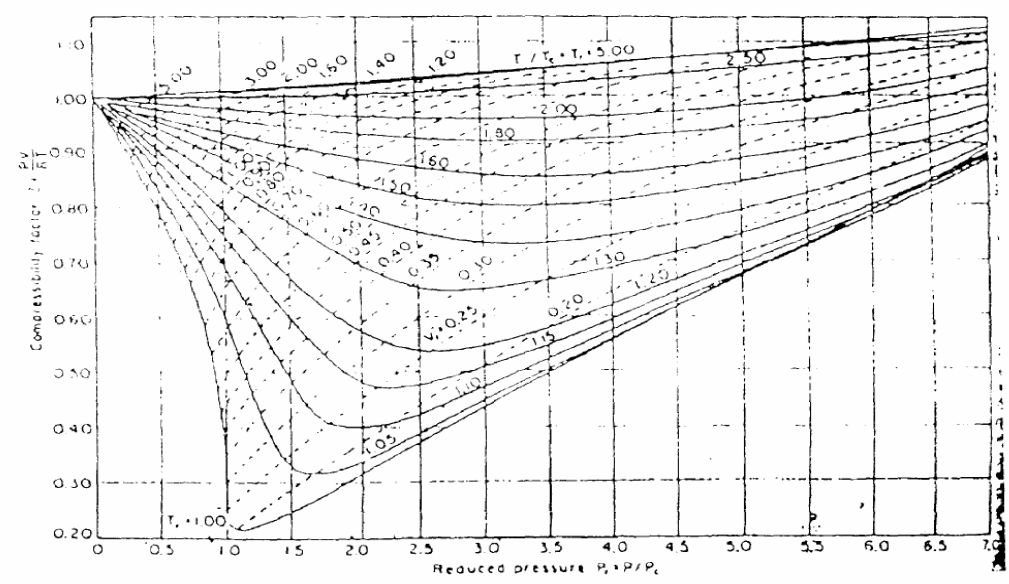


Figure M1- Détermination du coefficient de compressibilité Z.

# Annexe (10)

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 <sup>3</sup> /lb	
1	Methane	CH <sub>4</sub>	16.043	-258.72	(5000)*	-296.41 *	1.00041*	667.0	-116.66	0.0988	1
2	Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	-127.46	(800)*	-297.02*	1.20971*	707.8	90.07	0.0783	2
3	Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	-43.73	188.68	-305.72*	1.29480*	615.0	205.92	0.0727	3
4	Isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	10.78	72.598	-255.26	1.3245*	527.9	274.41	0.0714	4
5	n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	31.08	51.719	-217.03	1.33588*	548.8	305.51	0.0703	5
6	Isopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	82.09	20.450	-255.80	1.34771	490.4	368.96	0.0684	6
7	n-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	96.89	15.580	-201.48	1.35165	486.1	385.7	0.0695	7
8	Neopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	49.10	36.72	2.16	1.342*	464.0	321.01	0.0673	8
9	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	155.70	4.9614	-139.56	1.37708	439.5	451.8	0.0688	9
10	2-Methylpentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	140.44	6.769	-244.60	1.36571	436.6	435.76	0.0682	10
11	3-Methylpentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	145.86	6.103	-261.20	1.37090	452.5	448.2	0.0682	11
12	Neohexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	121.50	9.859	-147.68	1.36283	446.7	419.92	0.0667	12
13	2,3-Dimethylbutane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	136.33	7.406	-199.35	1.36938	454.0	440.08	0.0665	13
14	n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	209.07	1.6211	-130.99	1.38234	397.4	510.9	0.0682	14
15	2-Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	194.05	2.273	-180.87	1.37940	396.0	494.44	0.0673	15
16	3-Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	197.33	2.130	—	1.38326	407.6	503.62	0.0646	16
17	3-Ethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	200.26	2.012	-181.44	1.38800	419.2	513.16	0.0665	17
18	2,2-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	174.50	3.494	-190.80	1.37667	401.8	476.98	0.0665	18
19	2,4-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	176.85	3.294	-182.59	1.37591	397.4	475.72	0.0667	19
20	3,3-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	186.87	2.775	-209.99	1.38564	427.9	505.60	0.0662	20
21	Triptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	177.54	3.376	-12.21	1.38411	427.9	496.24	0.0636	21
22	n-Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	258.17	0.5374	-70.17	1.39248	361.1	563.5	0.0673	22
23	Diisobutyl	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	228.34	1.102	-132.09	1.38735	361.1	530.26	0.0676	23
24	Isooctane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	210.58	1.709	-161.23	1.38624	372.7	519.28	0.0657	24
25	n-Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128.258	303.40	0.1716	-64.26	1.40054	330.7	610.8	0.0693	25
26	n-Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.285	345.40	0.06091	-21.33	1.40720	304.6	652.2	0.0702	26
27	Cyclopentane	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.134	120.60	9.917	-136.89	1.40050	653.8	461.1	0.0594	27
28	Methylcyclopentane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.161	161.29	4.491	-224.38	1.40400	548.8	499.28	0.0607	28
29	Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.161	177.40	3.267	43.79	1.42053	590.7	536.6	0.0586	29
30	Methylcyclohexane	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	98.188	213.69	1.609	-195.87	1.41778	503.4	570.20	0.0600	30
31	Ethene(Ethylene)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	-154.71	(1400)*	-272.48*	(1.228)*	731.0	48.54	0.0746	31
32	Propene(Propylene)	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.081	-53.83	232.8	-301.45*	1.3006*	676.6	198.31	0.0717	32
33	1-Butene(Butylene)	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	20.79	62.55	-301.63*	1.3386*	586.4	296.18	0.0683	33
34	cis-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	38.69	45.97	-218.01	1.3556*	615.4	324.31	0.0667	34
35	trans-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	33.58	49.88	-157.97	1.3487*	574.9	311.80	0.0679	35
36	Isobutene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	19.57	64.95	-220.60	1.3473*	580.2	292.49	0.0681	36
37	1-Pentene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.134	85.92	19.12	-265.37	1.36487	509.5	376.86	0.0674	37
38	1,2-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.092	51.52	36.53	-123.14	—	(656.)*	(354.)*	(0.070)*	38
39	1,3-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.092	24.06	59.46	-164.00	1.3975*	620.3	306.	0.0653	39
40	Isoprene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	68.119	93.29	16.68	-230.71	1.41472	(582.)*	(403.)*	(0.066)*	40
41	Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.038	-119.21*	—	-113.4*	—	890.4	95.29	0.0693	41
42	Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.114	176.13	3.225	41.96	1.49436	710.4	552.15	0.0531	42
43	Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.141	231.08	1.033	-138.96	1.49102	595.5	605.50	0.0549	43
44	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.167	277.10	0.3716	-138.933	1.49022	523.0	651.22	0.0564	44
45	o-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.167	291.91	0.2643	-13.32	1.50017	541.6	674.85	0.0557	45
46	m-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.167	282.35	0.3265	-54.16	1.49177	512.9	650.95	0.0567	46
47	p-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.167	280.98	0.3424	55.87	1.49039	509.2	649.47	0.0572	47
48	Styrene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104.152	293.40	0.2582	-23.14	1.54937	587.8	(703.)*	0.0534	48
49	Isopropylbenzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.194	306.27	(0.188)	-140.838	1.48607	465.4	676.2	0.0569	49
50	Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> O	32.042	148.41	4.631	-143.77	1.32443	1174.	463.01	0.0590	50
51	Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	46.069	172.87	2.313	-173.4	1.35717	891.7	465.31	0.0581	51
52	Carbon monoxide	CO	28.010	-312.61	—	-336.99*	1.00028*	506.8	-220.51	0.0527	52
53	Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.010	-109.235*	—	-69.81*	1.00038*	1069.5	87.73	0.0342	53
54	Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	34.082	-76.49	394.67	-121.86*	1.00057*	1300.	212.40	0.0461	54
55	Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub>	64.065	14.11	85.46	-103.84*	1.00059*	1143.	315.7	0.0305	55
56	Ammonia	NH <sub>3</sub>	17.0305	-27.98	211.9	-107.85*	1.00033*	1647.	270.2	0.0681	56
57	Air	N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	28.9625	-317.81	—	—	1.00028*	546.9	-221.30	0.0517	57
58	Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.0159	-423.130*	—	-434.824*	1.00013*	187.5*	-400.3*	0.5101*	58
59	Oxygen	O <sub>2</sub>	31.9988	-297.317*	—	-361.826*	1.00027*	731.4	-181.41	0.0367	59
60	Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.0134	-320.436	—	-345.995*	1.00028*	492.8	-232.49	0.0510	60
61	Chlorine	Cl <sub>2</sub>	70.9054	-29.12	157.3	-149.70*	1.3735*	1157.	290.69	0.0280	61
62	Water	H <sub>2</sub> O	18.0153	211.953*	0.95014	32.018	1.33335	3200.1	705.11	0.04975	62
63	Helium	He	4.0026	-452.110	—	—	1.00003*	32.99	-450.31	0.2300	63
64	Hydrogen chloride	HCl	36.4606	-121.25	906.71	-173.50*	1.00039*	1205.	124.75	0.0356	64

9/15/95

Constantes critiques de pression et de température.